

**BESTANDSAUFNAHME
DER NATURWERKSTEINE
UND
IHRES VERWITTERUNGSZUSTANDES
IN DER INNENSTADT MÜNCHENS**

Ulrich Schwarz



Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41547927_0005

BESTANDSAUFNAHME DER NATURWERKSTEINE
UND IHRES VERWITTERUNGSZUSTANDES
IN DER INNENSTADT MÜNCHENS

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Fakultät für Geowissenschaften
der Ludwig-Maximilians-Universität zu München

vorgelegt von
Ulrich Schwarz
München, Juli 1986

1. Berichterstatter: Prof. Dr. W.-D. GRIMM
2. Berichterstatter: Dr. habil. R. SNETHLAGE

Tag der Abgabe: 31.07.1986

Tag der mündlichen Prüfung: 15.12.1986

Inhaltsverzeichnis

	<u>Seite</u>
Vorwort	1
1. Einleitung	3
2. Allgemeine Stadtkartierung	6
2.1. Kartengrundlagen und Gebietsaufteilung	8
2.2. Vorgehensweise bei der Kartierung	11
2.3. Auswertung der Allgemeinen Stadtkartierung	12
2.3.1. Gebäudebestand	12
2.3.2. Bauteile aus Naturstein	16
2.3.3. Verwendete Gesteinsarten	19
2.3.4. Bauteile und Gesteinsarten	21
2.3.5. Verwitterungszustand	29
3. Beschreibung der wichtigsten Werksteinarten	33
3.1. Carbonatgesteine und kristalline Marmore	33
3.1. 1. Muschelkalk	33
3.1. 2. Donaukalk	34
3.1. 3. Travertin	34
3.1. 4. Treuchtlinger Kalk	35
3.1. 5. Knollenkalk	35
3.1. 6. Sonstige Carbonatgesteine	36
3.1. 7. Kristalliner Marmor	36
3.1. 8. Frankendolomit	36
3.1. 9. Kalktuff	37
3.1.10. Wallenfels-Kalkstein	37
3.1.11. Solnhofener Kalk	37
3.1.12. Botticino-Kalk	37
3.1.13. Untersberger Kalk	38
3.1.14. Devonkalke	38
3.1.15. Zola-Repen-Kalkstein	38
3.1.16. Rosenheimer Kalk	38
3.1.17. Enzenauer Kalk	39
3.2. Silikatische Kristallingesteine	39
3.2. 1. Granite	39
3.2. 2. Gneise	41
3.2. 3. Dunkle magmatische Gesteine	41
3.2. 4. Serpentin	41
3.2. 5. Kristalline Schiefer	42
3.2. 6. Glimmerschiefer, Phyllite	42
3.2. 7. Basalt-Lava	42
3.2. 8. Larvikit	42
3.2. 9. Trachyt-Tuff	43
3.2.10. Suevit	43
3.2.11. Porphyrit	43
3.3. Klastische Sedimentgesteine	43
3.3. 1. Bayerische Nagelfluh	43
3.3. 2. Italienische Ceppo-Nagelfluh	44
3.3. 3. Sonstige Sandsteine	44
3.3. 4. Grünsandstein	45
3.3. 5. Buntsandstein	45
3.3. 6. Tonschiefer	46

4.	Expositionsdauer	47
4.1.	Ermittlung der Daten zur Expositionsdauer	47
4.2.	Stadtbaugeschichte Münchens	51
4.3.	Verbaualter der Naturwerkstein-Vorkommen	55
4.3.1.	Gebäude	55
4.3.2.	Denkmäler, Brunnen, Plastiken	59
5.	Ursachen der Werksteinverwitterung (Verhältnisse in München)	63
5. 1.	Umfeld	71
5. 1.1.	Klima	71
5. 1.2.	Baugrund	75
5. 2.	Gestein	77
5. 3.	Temperatur und Strahlung	78
5. 3.1.	Lufttemperatur	78
5. 3.2.	Insolation	79
5. 3.3.	Brandwirkung	83
5. 4.	Luft und Luftbewegung	84
5. 5.	Wasser	87
5. 5.1.	Luftfeuchtigkeit	88
5. 5.2.	Regenwasser	92
5. 5.2.1.	Schlagregen	94
5. 5.2.2.	Ablaufwasser	96
5. 5.2.3.	Stauwasser und Bodenwasser	97
5. 5.2.4.	Sickerwasser	97
5. 5.2.5.	Winddruckwasser	98
5. 5.2.6.	Kapillarwasser	98
5. 5.2.7.	Tropfwasser	99
5. 5.2.8.	Spritzwasser	100
5. 5.3.	Grundfeuchte	100
5. 5.4.	Schnee und Eis	101
5. 6.	Inhaltsstoffe in Wasser und Luft	103
5. 6.1.	Feststoffe	103
5. 6.2.	Gasförmige Stoffe	108
5. 6.2.1.	Kohlendioxid (CO ₂)	109
5. 6.2.2.	Schwefeldioxid (SO ₂)	110
5. 6.2.3.	Stickoxide (NO _x)	114
5. 6.3.	Gelöste Stoffe	116
5. 6.3.1.	Säuregehalt des Niederschlags	116
5. 6.3.2.	Wasserlösliche Stoffe	117
5. 6.3.3.	Chemische Analysen von Niederschlagswässern	121
5. 7.	Organismen	127
5. 7.1.	Mikroorganismen	127
5. 7.2.	Höhere Pflanzen	128
5. 7.3.	Tiere	128
5. 8.	Schwerkraft	129
5. 9.	Zeit	130

	<u>Seite</u>
5.10.	Anthropogene Einflüsse 131
5.10.1.	Mittelbare anthropogene Einflüsse 131
5.10.1.1.	Stadtklima 131
5.10.1.2.	Industrialisierung 132
5.10.1.3.	Öffentliche Energieversorgung 135
5.10.1.4.	Straßenverkehr 139
5.10.1.5.	Stadtentwässerung 142
5.10.1.6.	Bautätigkeit 143
5.10.1.7.	Bautechnik 143
5.10.1.8.	Gesteinsauswahl 145
5.10.2.	Unmittelbare anthropogene Einflüsse 145
5.10.2.1.	Bearbeitung, Behandlung und Verbau von Naturwerksteinen 145
5.10.2.2.	Verschmutzungen 147
5.10.2.3.	Mechanisch verursachte Schäden 147
6.	Analysen von Verwitterungserscheinungen 148
6.1.	Bruchschäden 149
6.2.	Schäden durch Ausblühungssalze im Sockelbereich von Gebäuden 153
6.2.1.	Gesteinsarten 155
6.2.2.	Schadensformen 159
6.2.3.	Schadensintensitäten 165
6.2.4.	Expositionsrichtung 170
6.2.5.	Analysen von Ausblühungssalzen 175
6.3.	Verwitterung des Muschelkalks 181
6.3.1.	Verwitterungserscheinungen 183
6.3.2.	Expositionsdauer 193
6.3.3.	Expositionsrichtung 195
6.4.	Schalenverwitterung nordostbayerischer Granite 200
6.4.1.	Werksteinvorkommen nordostbayerischer Granite in München 201
6.4.2.	Verwitterungserscheinungen 203
6.4.3.	Expositionsdauer 216
6.4.4.	Expositionsrichtung 221
7.	Zusammenfassung 222
8.	Anhang 228
8.1.	Literaturverzeichnis 228
8.2.	Verzeichnis der Abbildungen 234
8.3.	Verzeichnis der Tabellen 237
8.4.	Verzeichnis der Anlagen 239
Anlage 1	Gesteinsarten 1a Altstadt 1b Stadterweiterungen des 19.Jh.
Anlage 2	Verwitterungszustand 2a Altstadt 2b Stadterweiterungen des 19.Jh.
Anlage 3	Expositionsdauer 3a Altstadt 3b Stadterweiterungen des 19.Jh.

Vorwort

Der thematische und organisatorische Rahmen für die vorliegende Arbeit war gegeben durch den "Antrag auf Gewährung einer Sachbeihilfe für ein Forschungsvorhaben, betreffend das Verwitterungsverhalten von Naturwerksteinen in München in Abhängigkeit von Zeit und Ort", gestellt am 10.08.1978 an die Stiftung Volkswagenwerk durch Prof. Dr. W.-D. GRIMM, den Leiter der Arbeitsgruppe für Sedimentologie, Ingenieur- und Hydrogeologie am Institut für Allgemeine und Angewandte Geologie der Universität München.

Nach Bewilligung der Finanzierung des Projektes durch die Stiftung Volkswagenwerk begann die auf 2 Jahre angelegte Forschungstätigkeit am 01.03.1980 mit 4 wissenschaftlichen Mitarbeitern, den Diplom-Geologen L. BICHLMANN, W. KIECHLE, W. LINDENTHAL und U. SCHWARZ. Am 05.09.1985 reichte Prof. Dr. W.-D. GRIMM den Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben: "Verwitterungsverhalten von Naturwerksteinen in München in Abhängigkeit von Zeit und Ort" bei der Stiftung Volkswagenwerk ein. Der Bericht erscheint demnächst in leicht geänderter Form in Heft 31 der Arbeitshefte des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege unter dem Titel: GRIMM & SCHWARZ "Naturwerksteine und ihre Verwitterung an Münchner Bauten und Denkmälern".

Die Arbeiten wurden im wesentlichen am Institut für Allgemeine und Angewandte Geologie der Universität München durchgeführt. Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. W.-D. GRIMM für sein anhaltendes und wohlwollendes Interesse am Gelingen der Arbeit, für vielfältige Anregungen und Diskussionen und natürlich für die Initiierung und Organisation des gesamten Forschungsvorhabens.

Für wertvolle Anregungen, Diskussionen und Hilfeleistungen danke ich den Mitarbeitern unserer Forschungsgruppe L. BICHLMANN, W. KIECHLE und W. LINDENTHAL. Weiter gilt mein Dank Herrn Dr. R. HEROLD sowie den unter der Leitung von Prof. Dr. W.-D. GRIMM im Rahmen ihrer Diplomarbeiten mit Fragen der Natursteinverwitterung befaßten Diplomanden K. POSCHLOD (Kartierung der Grabdenkmäler auf dem Alten Südfriedhof in München) und J. VÖLKL (Rauheitsmessungen an Naturwerksteinen).

Etwa gleichzeitig mit den Arbeiten unserer Forschungsgruppe und ebenfalls unterstützt durch Mittel der Stiftung Volkswagenwerk vollzog sich in den Räumen des Geologischen Institutes der Aufbau des "Zentrallabors für Denkmalpflege" des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege unter der Leitung von Dr. R. SNETHLAGE. Ihm und den wissenschaftlich-technischen Mitarbeitern des Labors möchte ich danken für den freundlich gewährten Informationsaustausch und die technische Hilfe.

Enge Kontakte bestanden zu den unter Leitung von Prof. Dr. D. D. KLEMM an Problemen des physikalischen Verhaltens von Naturwerksteinen und der Steinrestaurierung arbeitenden Studienkollegen H. ETTL und H. SCHUH.

Den Institutsleitern Prof. Dr. K. SCHMIDT und Prof. Dr. K. WEBER-DIEFENBACH danke ich für die Erlaubnis zur Benutzung der Laboreinrichtungen des Institutes.

Der Stiftung Volkswagenwerk gilt mein besonderer Dank für die 2 Jahre währende finanzielle Unterstützung der Arbeiten.

Herr Dr. J. FROH, Lehrstuhl für Angewandte Geologie der Technischen Universität München, ermöglichte die Anfertigung der REM-Aufnahmen und der EDAX-Analysen.

Frau U. DÜMMER führte die Reinzeichnung der 6 Stadtkarten aus.

Herr J. GELDHAUSER, Lehrstuhl für Hochbaukonstruktion und Baustoffkunde der Technischen Universität München, stellte wiederholt und gerne seinen Erfahrungsschatz über den Naturwerksteinbestand Münchens zur Verfügung.

Unterlagen über die meteorologischen und lufthygienischen Verhältnisse Münchens, über Verbaudaten von Naturwerksteinen, über die Energieversorgung der Stadt sowie geeignetes Kartenmaterial für die Kartierung der Innenstadt stellten zur Verfügung:

- Bayerisches Landesamt für Umweltschutz,
- Wetteramt München des Deutschen Wetterdienstes,
- Städtisches Vermessungsamt München,
- Städtisches U-Bahn-Referat,
- Städtisches Bauamt Brücken und Tiefbau,
- Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege,
- Stadtwerke München.

Bei den namentlich genannten Damen und Herren, bei den Mitarbeitern der verschiedenen Ämter und bei den vielen nicht genannten Personen, die zum Fortgang der Arbeiten mit beigetragen haben, möchte ich mich für ihre Mithilfe und ihr Entgegenkommen herzlich bedanken.

1. EINLEITUNG

Im letzten Jahrzehnt hat die Forschungsaktivität auf den Gebieten der Naturwerksteinverwitterung und der Naturwerksteinkonservierung erheblich zugenommen. Man hatte erkannt, daß viele Bauten aus Naturstein und die im Freien aufgestellten Steinbildwerke durch vor allem anthropogene Umwelteinflüsse in ihrer Substanz und in ihrem Bestand derart gefährdet waren, daß sie ohne geeignete Gegenmaßnahmen dem Verfall preisgegeben sein würden. Zudem machten die inzwischen verbesserten naturwissenschaftlichen Möglichkeiten zur Untersuchung und Behandlung von Baumaterialien eine Neuorientierung auf dem Gebiet der Steinrestaurierung und -konservierung erforderlich. Die Komplexität des Verwitterungsgeschehens, innerhalb dessen die unterschiedlichsten Gesteine mit den natürlichen und den anthropogen provozierten Verwitterungseinflüssen in Reaktion treten, zeigt sich daran, daß bis heute als Ergebnis intensiver Forschungen in der Regel mehr Fragen aufgeworfen als beantwortet werden.

Bei dem von Prof. Dr. W.-D. GRIMM geleiteten und durch die Stiftung Volkswagenwerk finanziell unterstützten Forschungsvorhaben "Verwitterung von Naturwerksteinen in München in Abhängigkeit von Zeit und Ort" lag das Schwergewicht der Arbeiten - anders als bei reinen physikalischen und chemischen Laboruntersuchungen - in der Beobachtung der Verwitterungsphänomene an Naturwerksteinen in ihrer natürlichen Umgebung: "Die Stadt München sollte sozusagen als großes Laboratorium angesehen werden; und die Experimente, die die Natur selbst Jahrzehnte oder Jahrhunderte lang an einer breiten Palette von Naturwerksteinen vollzog und vollzieht, sollten nachträglich am Objekt registriert und mittels geologischer, petrographischer, physikalischer, chemischer und technischer Analysen beurteilt werden" (GRIMM 1980).

München schien für eine derartige Untersuchung prädestiniert zu sein: "In der wohlhabenden Stadt ist der Reichtum an repräsentativen Werksteinen seit dem Mittelalter groß. Hinzu kommt eine auffällige Vielfalt an Gesteinsarten; da es in der näheren Umgebung der Stadt an nutzbaren Felsgesteinen mangelt, wurde der Werkstein seit eh und je aus allen Richtungen importiert, zunächst aus ganz Bayern, dann aus Europa und in jüngster Zeit aus allen Kontinenten" (GRIMM 1980).

Im einzelnen waren folgende Untersuchungen vorgesehen:

- Erfassung und Kartierung der Naturwerksteine in verschiedenen Stadtregionen (Friedhöfe; Stadtzentrum) nach den Natursteintypen, deren Herkunft, Verbauart und Verbaualter, Exposition und Witterungsbeanspruchung;
- petrographische Beschreibung der Werksteine;

- gefügekundliche Untersuchungen der Werksteinstrukturen und -texturen;
- mineralogische und gesteinsphysikalische Untersuchungen des Porenraumes frischer und verwitterter Gesteine;
- Beobachtungen zum Entfestigungs- und Verfestigungsgrad verwitterter Partien;
- technologische Untersuchungen verwitterter und unverwitterter Gesteinsproben nach DIN 52 100 - 52 114;
- Untersuchungen zur Verfärbung und Entfärbung der Gesteine;
- Bewertung der Verwitterungsbeständigkeit aufgrund statistischer Auswertung der beobachteten Phänomene und der Analysendaten.

Das gesamte Aufgabengebiet wurde unter der Leitung von Prof. Dr. W.-D. GRIMM von insgesamt 6 wissenschaftlichen Mitarbeitern bearbeitet. Dabei wurde wie folgt verfahren:

- Dipl.-Geol. Lieselotte BICHLMANN übernahm die Untersuchung der carbonatischen Naturwerksteine. Darüber hinaus befaßte sie sich übergreifend mit dem Mineralbestand und dem Gefüge der wichtigsten Werksteintypen.
- Dipl.-Geol. Wilhelm KIECHLE war für die Bearbeitung der klastischen Sedimentgesteine zuständig; zusätzlich für Untersuchungen des Porenraumes der wichtigsten Gesteine in frischem und verwittertem Zustand.
- Dipl.-Geol. Walter LINDENTHAL bearbeitete die silikatischen Kristallgesteine und die durch Verwitterungsprozesse ausgelösten chemischen Veränderungen an Werksteinen.

Im Rahmen ihrer Diplomarbeiten wurden zu einem späteren Zeitpunkt an dem Projekt beteiligt:

- Jürgen VÖLKL mit der Arbeit: "Eine neue Methode zur Untersuchung der Rauigkeit von Naturwerksteinen mit Beispielen aus München" (VÖLKL 1982; GRIMM & VÖLKL 1983).
- Klaus POSCHLOD mit der Bearbeitung von 113 Grabdenkmälern und deren Verwitterungserscheinungen im Alten Sudfriedhof zu München (POSCHLOD 1984; POSCHLOD & GRIMM 1984).

Der Verfasser der vorliegenden Arbeit sollte sich vor allem mit der statistischen Auswertung der Beobachtungen, Analysen und sonstigen Daten zur Verwitterung befassen. Aus dieser Aufgabenstellung heraus entwickelte sich das Konzept der Arbeit:

- Im ersten Teil wird der Naturwerksteinbestand der Innenstadt Münchens vorgestellt:
 - Zahl der Gebäude und Objekte mit Bauteilen aus Naturstein;
 - Bauteile aus Naturwerkstein;
 - Verwendete Gesteinsarten;
 - Verwitterungszustand der Werksteine;
 - Verbaualter der Werksteinteile.

Untersuchungsgegenstand sind alle zum Zeitpunkt der Kartieraufnahme im Außenbereich verbauten Naturwerksteine innerhalb des Münchner Altstadttringes sowie in den Bereichen der im 19. Jahrhundert angelegten Stadterweiterungen: Maxvorstadt, Ludwigstraße, Maximilianstraße, Prinzregentenstraße.

- Ein zweiter Hauptteil der Arbeit beschäftigt sich mit den wichtigsten Verwitterungsfaktoren unter besonderer Berücksichtigung der speziellen Münchner Verhältnisse. Dabei wurde folgende Gliederung zugrunde gelegt:
 - Umfeld (Klima; Baugrund)
 - Gestein
 - Temperatur und Strahlung
 - Luft und Luftbewegung
 - Wasser
 - Inhaltsstoffe in Luft und Wasser
 - Organismen
 - Schwerkraft
 - Zeit
 - Mittelbare und unmittelbare anthropogene Einflüsse
- Schließlich werden wichtige Arten und Abläufe der Gesteinsverwitterung phänomenologisch beschrieben und auf mögliche Abhängigkeiten von der Expositionsdauer und der Expositionsrichtung der Werksteine hin untersucht. Als Beispiele wurden ausgewählt:
 - Bruchschäden,
 - Schäden durch Ausblühungssalze,
 - Verwitterung des Muschelkalks,
 - Verwitterung der nordostbayerischen Granite.

Der Verfasser möchte darauf hinweisen, daß er die Ergebnisse der Natursteinkartierung in der Innenstadt Münchens, insbesondere den Text der allgemeinen Stadtkartierung und die 3 Stadtkarten zum Gesteinsbestand, Verwitterungszustand und zur Expositionsdauer der Werksteine für weiterführende Arbeiten und für zusammenfassende Veröffentlichungen der Arbeitsgruppe von Prof. Dr. W.-D. GRIMM gern zur Verfügung stellt.

2. ALLGEMEINE STADTKARTIERUNG

Ziel der vorliegenden Arbeit wie auch des gesamten übergreifenden Forschungsprojektes war es, aus dem Studium der Verwitterungserscheinungen an Naturwerksteinen in München auf Abläufe und Ursachen der Gesteinsverwitterung in städtischem Milieu zu schließen (GRIMM 1980; 1983). Der Verfasser hatte die Aufgabe übernommen, Abhängigkeiten zwischen mutmaßlichen Verwitterungsfaktoren und den feststellbaren Verwitterungserscheinungen über alle Gesteinsarten hinweg herauszuarbeiten.

Um bei den statistischen Auswertungen Fehlermöglichkeiten auszuschließen, die durch eine willkürliche Auswahl von Beobachtungsmaterial leicht entstehen können, wurde ein fest umrissener Bereich der Münchner Innenstadt als Arbeitsgebiet ausgewählt. Innerhalb dieses Bereiches sollten alle vorhandenen Naturwerksteinvorkommen an Außenfassaden und als freistehende Einzelobjekte aufgenommen und in die Untersuchungen einbezogen werden.

Das ausgewählte Arbeitsgebiet umfaßt die in ihrer Anlage seit dem 14. Jahrhundert bestehende Altstadt Münchens, heute umfassen durch den sog. "Altstadtring", sowie vier außerhalb der eigentlichen Altstadt gelegene Bereiche, die im 19. Jahrhundert als vorwiegend repräsentative Straßenanlagen geplant wurden und zur Ausführung kamen.

Mit einer ersten Übersichtskartierung im Jahre 1980 konnte das Ziel, alle an Gebäuden und freistehenden Objekten vorhandenen Naturwerksteine aufzunehmen, ihren Zustand zu beschreiben und in einer für die Weiterarbeit geeigneten Form niederzulegen, nicht erreicht werden, da sich Kriterien zur Gesteinsansprache, zu Verwitterungsart und -ausmaß erst allmählich durch wachsende Vergleichsmöglichkeiten im Verlauf der Kartiertätigkeit herausbildeten. Vor einer ersten geschlossenen schriftlichen Fixierung der Bestandsaufnahme war eine zweite Begehung des Stadtgebietes unter einigermaßen einheitlicher Betrachtungsweise notwendig. Korrekturen und Ergänzungen, die sich im weiteren Verlauf der Arbeiten bis 1984 ergaben, wurden laufend in den Text eingefügt. Die Beobachtungen sind niedergelegt in einer 330 Seiten umfassenden, handschriftlichen Fassung; Interessenten haben die Möglichkeit, sie beim Verfasser bzw. im Institut für Allgemeine und Angewandte Geologie der Universität München einzusehen. Ein kurzer Auszug des Textes ist in Tabelle 1 wiedergeben.

Die Ergebnisse der Übersichtskartierung ("Allgemeine Stadtkartierung") erlauben es, hinreichend genaue Aussagen zu machen über die Vorkommen der Naturwerksteine (Art der Bauteile und deren Expositionen) sowie über die verwen-

Tab. 1: Auszug aus dem Text der Allgemeinen Stadtkartierung

Gruggenauer Viertel

G 1

Residenzstr. 27 / Ecke Viscardigasse / Ecke Theatinerstr. (ehem. Palais Preysing, 1728)

Ostseite:	Sockel (0,6 m)	Frankendolomit (grau, porös)	geschliffen	verschmutzt
	Fensterbrüstungen	Frankendolomit (grau, porös)	bossiert	verschmutzt
	Portaltelle (Skulen, Sockel, Türgewände, Balkon)	Tegernseer Knollenkalk	?	auf geschützter Seite schwarze Kruste mit Abplatzungen und Ausbrüchen; sonst stark ausgewittert und hell gebleicht; Ausbesserungen
	Skulptur an der Ecke	Kalkbreccie (hellgrau mit Calcitadern)	?	im Regenschatten schwarz verkrustet und verschmutzt, sonst hell abgewittert und ausgebleicht
Südseite:	Sockel (0,6 m)	Frankendolomit (grau, porös)	geschliffen	vom oberen und unteren Rand her verschmutzt
Westseite:	Sockel (0,6 m)	Frankendolomit (grau, porös)	geschliffen	verschmutzt
Passage:	Wandverkleidung	Treuchtlinger Kalk	poliert	leicht gealterte Oberfläche
	Bodenbelag	Treuchtlinger Kalk	poliert	löcherig ausgetreten

Theatinerstr. 29 / Ecke Viscardigasse ("Juwelier Hirsch")

Nordseite:	EG-Fassade und Eckpfeiler	Muschelkalk	geschliffen	angeschmutzt; tonige Partien wittern aus; Ausbrüche; am Pfeiler Hundeklo
	Namensschild	Granit (grobkörnig, rot)	poliert	neu
Westseite:	EG-Fassade	Muschelkalk	geschliffen	verschmutzt; tonige Partien wittern aus; Ausbrüche

Theatinerstr. 30 ("Scheinmann-Schuhe")

Westseite:	Gesamtfassade	Donaukalk (gewölkt, leicht rosa)	geschliffen	neu
------------	---------------	----------------------------------	-------------	-----

Theatinerstr. 31

Westseite:	EG-Fassade und Eingangsgewände	Chloritschiefer	bruchrauhe Reichen	leicht angeschmutzt
------------	--------------------------------	-----------------	-----------------------	---------------------

Theatinerstr. 32

Westseite:	Gesamtfassade	Treuchtlinger Kalk	geschliffen	ausgebleicht
	Platten unter Schaufenstern	Serpentinit	poliert	von unten her verschmutzt

Theatiner-Passage bis zum Innenhof

	Platten unter Schaufenstern	Serpentinit	poliert	von unten her verschmutzt
	EG-Fassade "Gitta Burfind"	Travertin	poliert	
	Bodenbelag	Treuchtlinger Kalk + Travertin	poliert	löcherig ausgetreten; Poren schwarz verschmutzt; teilweise blankgetreten
	Treppe nach unten Wandverkl. + Stufen	Treuchtlinger Kalk	poliert	abgenutzt; Kanten z.T. abgebrochen
	Treppe nach oben (Stufen)	Serpentinit	poliert	
	Brunnenschale	Konglomerat (mit groben Fossilteilen)	außen bossiert, sonst geschliffen	

Theatinerstr. 33 + 34

Westseite:	EG-Fassade	Muschelkalk (Goldbank)	geschliffen	tonige Partien bereichsweise ausgewittert und ausgebrochen; ausgebleicht; von unten her dunkel verschmutzt; Hundeklos. Starke Beschädigungen der unteren Platten: Ausbrüche, abgebrochene Kanten; Ausblühungen
------------	------------	------------------------	-------------	---

Residenz-Passage bis zum Innenhof

	Wandverkleidung	Muschelkalk (Goldbank)	poliert	tonige Partien ausgebrochen, besonders an den unteren Platten; Hundeklos
--	-----------------	------------------------	---------	--

Theatinerstr. 35

Westseite:	EG-Fassade	Muschelkalk	geschliffen	tonige Partien ausgewittert; unten und unter Fenstervorsprüngen stark verschmutzt
	Platten unter Schaufenster + Bodenbelag ("Eder Moden")	Marmor	poliert	Bodenplatten leicht bräunlich verfärbt

deten Gesteinsarten. Sie geben außerdem Hinweise auf das Auftreten von Verwitterungsphänomenen und deren Ausmaß. Eine Darstellung der Ergebnisse in vereinfachter Form ist in den beiden im Anhang des Bandes beigelegten Stadtkarten: "Gesteinsarten" (Anlagen 1a und 1b) und "Verwitterungszustand" (Anlagen 2a und 2b) wiedergegeben. Für die genauere Analyse bestimmter Verwitterungsvorgänge waren allerdings Spezialkartierungen notwendig, auf die in Kapitel 6. eingegangen wird.

Frühere Naturwerksteinkartierungen aus München, die Vergleichsmöglichkeiten und Anregungen lieferten, liegen vor von REIS (1935) und GELDHAUSER (1982). REIS beschreibt die im Raum München bis 1934 verbaut gewesenen Werksteine vor allem hinsichtlich einer Bestimmung der Gesteinsarten und ihrer Herkunft. Im Anhang des Buches gibt STOLS einen kurzen Überblick über "Verwitterung und Steinschutz". GELDHAUSER geht es in seiner Zusammenstellung darum, Anschauungsmaterial zur Natursteinverwendung für Architekturstudenten zu liefern. Er führt eine große Anzahl von Bauteilen und Gebäuden im "erweiterten Stadtkern" an, mit Nennung der jeweils beteiligten Gesteinsarten und unter gelegentlichen Hinweisen zur Oberflächenbearbeitung und zum Verwitterungszustand.

Mit der Verwitterung von Bausteinen bestimmter Regionen (Franken, Goslar, Schweiz, Saarland) befassen sich die neueren Arbeiten von KESSLER (1960), FRANK (1981), ZEHNDER (1982), WEBER (1983).

2.1. Kartengrundlagen und Gebietsaufteilung

Als Arbeitsgrundlagen für die Kartierung des Stadtgebietes wurden Stadtkarten (1:5000) und Stadtgrundkarten (1:2500) des Städtischen Vermessungsamtes München benutzt, die auf dem Kartenwerk der bayerischen Flurkarten basieren.

Die das Stadtgebiet abdeckenden Stadtkarten (1:5000) besitzen eine zusätzliche Durchnumerierung von 1 bis 82. Die vier, das Stadtzentrum abbildenden Blätter tragen die Nummern: N.W.I.1.(18), N.O.I.1.(19), S.W.I.1.(25) und S.O.I.1.(26). Der für viele Belange störend wirkende Blattschnitt dieser vier Karten mit dem gemeinsamen Anstoßpunkt im Nordturm der Frauenkirche entfällt im "Zusamendruck Innenstadt" mit dem Maßstab der Flurkarten von 1:5000.

Die Stadtgrundkarten im Maßstab 1:2500 bauen aus jeweils 4 Blättern eine Flurkarte 1:5000 auf. Die Bezeichnung dieser Blätter ergibt sich durch Zusatz der kleinen Buchstaben a, b, c und d zur Flurkartennumerierung. Auch von der Stadtgrundkarte existiert ein Zusamendruck für den inneren Stadtbereich, die "Sonderkarte Innenstadt" (1:2500).

Für die Zeichnung der 6 im Anhang beigelegten Stadtkarten zur Naturwerksteinkartierung konnten vom Städtischen Vermessungsamt besondere Folienabzüge im Maßstab 1:2500 erworben werden. An dieser Stelle sei namentlich Herrn RENNER vom Vermessungsamt gedankt, der sich unseren besonderen Wünschen gegenüber stets aufgeschlossen und hilfsbereit zeigte.

Als Unterlagen für die Kartierarbeit sowie für die darauf aufbauenden verschiedenen Auswertungen und Darstellungen erwiesen sich die Kartenmaßstäbe 1:5000 und 1:2500 als die brauchbarsten. Neben mehreren kleiner maßstäblichen Blättern sind Kartenserien in den Maßstäben 1:1000, 1:500 und 1:100 erhältlich. Auf ihnen ließen sich zwar wesentlich mehr Details der Kartierbeobachtungen eintragen, eine übersichtliche Darstellung des gesamten Altstadtgebietes ist damit allerdings nicht mehr möglich.

Zur besseren Orientierung innerhalb des Kartiergebietes wurde die Innenstadt in 9 Viertel aufgeteilt und diese mit den Kennbuchstaben: N, K, G, H, A, WE, LU, PR und MA versehen. K, G, H und A entsprechen den vier historischen Altstadtvierteln: Kreuzviertel (K), Graggenauer Viertel (G), Hackenviertel (H) und Angerviertel (A); die übrigen Viertel sind mehr oder weniger willkürlich benannt. Alle 9 Viertel wurden sodann in überschaubare Bezirke aufgeteilt und diese jeweils durchnummeriert. Zur Gebiets- und Bezirksaufteilung siehe Abbildung 1 und Abbildung 2.

Die vorliegende Kartierung setzt sich also zusammen aus den 134 Bezirken:

N	(Nördliches Viertel)	1 - 11
K	(Kreuzviertel)	1 - 25
G	(Graggenauer Viertel)	1 - 32
H	(Hackenviertel)	1 - 13
A	(Angerviertel)	1 - 31
WE	(Westliches Viertel = "Maxvorstadt")	1 - 13
LU	(Ludwigstraße)	1 - 3
PR	(Prinzregentenstraße)	1 - 3
MA	(Maximilianstraße)	1 - 3

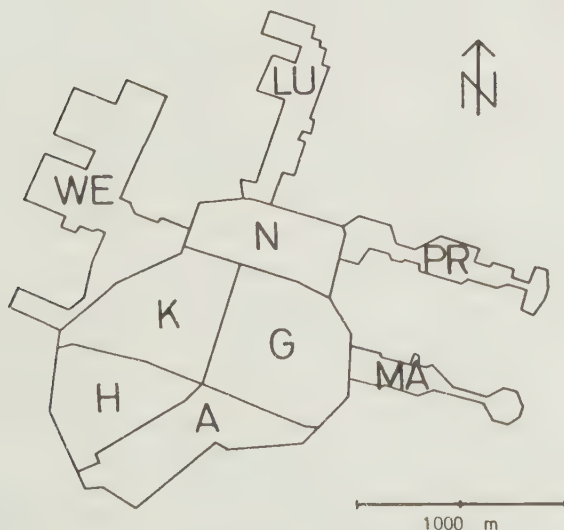


Abb. 1: Gebietsaufteilung der Innenstadt in Kartierviertel



Abb. 2: Gebietsaufteilung der Innenstadt in Kartierbezirke
(Kartengrundlage: Städtisches Vermessungsamt München;
Höhe des Kartenausschnittes: ca. 2,3 km)

2.2. Vorgehensweise bei der Kartierung

Die Beschreibung der einzelnen Bezirke erfolgt jeweils umlaufend um die Gebäude oder Gebäudeblocks. Diese Methode hat gegenüber einer Kartierung nach Straßenzügen den Vorteil, daß zusammenhängende Fassadenstrecken auch zusammenhängend und vollständig aufgenommen werden können. Jede Hausnummer ist berücksichtigt, ob mit oder ohne Natursteinvorkommen. Eckgebäude sind als solche gekennzeichnet und die verschiedenen Ansichten nach ihrer Himmelsausrichtung einzeln beschrieben. Passagen und Innenhöfe (soweit erfaßt) sowie einzeln stehende Objekte (Denkmäler, Brunnen, Blumenkästen etc.) erscheinen in Verbindung zum jeweils zugehörigen oder nächststehenden Anwesen. Zur besseren Orientierung werden zuweilen zusätzlich zur Hausnummer nähere Bestimmungen aufgeführt (Geschäftsamen, Bezeichnungen von Kirchen, Banken etc.), in manchen Fällen das am Gebäude angeschriebene Baudatum.

Die Beschreibung der Werksteine eines Anwesens geht vom Straßennamen und der Hausnummer aus. Sodann werden diejenigen Bauteile aufgeführt, die aus Naturstein erstellt sind. Es folgen die Gesteinsbezeichnungen, die ursprüngliche Bearbeitungsart der Gesteinsoberflächen sowie Bemerkungen zum jetzigen Zustand, zu Verschmutzung und Verwitterung (Tabelle 1).

Angaben zum ursprünglichen Werksteinzustand berücksichtigen, soweit noch zu erkennen, die Bearbeitungsarten:

- | | |
|--------------|---------------|
| - bruchrauh | - geschurt |
| - bossiert | - geflammt |
| - scharriert | - gesägt |
| - gespitzt | - geschliffen |
| - gestockt | - poliert |

Außerdem den Gesteinszustand:

- neu
- renoviert

Die Beschreibung der Verwitterungserscheinungen richtete sich nicht nach einem vorgegebenen Schema, sondern wurde, um unvoreingenommene Beobachtungen zu gewinnen, dem jeweils subjektiv empfundenen Eindruck beim Betrachten der Gebäudeteile überlassen.

Von wesentlicher Bedeutung für die Zielsetzung der Kartierarbeit war der Anspruch, mit Ausnahme von Innenraumverkleidungen, Straßenpflasterungen und Randsteinen grundsätzlich alle Naturwerksteinvorkommen an öffentlich zugänglichen Außenfassaden und an freistehenden Objekten aufzunehmen. Angesichts der großen Zahl von Baulichkeiten sowie der Vielfalt der Stadtarchitektur insgesamt ergaben sich jedoch zwangsläufig gewisse Unvollständigkeiten:

- Kleinere Stufen, Sockelleisten, Mäuerchen, Details an Fassaden, überstrichene, überputzte oder verblendete Natursteine etc. mögen

mitunter übersehen oder übergangen worden sein. Das aufgezeichnete Datenmaterial stellt also den Mindestbestand an Werksteinen dar.

- Mehrere gleichartige Stücke sind meist zusammenfassend behandelt.
- Naturwerksteinausstattungen von Innenhöfen, die nicht jederzeit öffentlich zugänglich sind, wurden nicht in die Beschreibung aufgenommen (z.B. Residenzhöfe, Münzhof).
- Zugunsten der möglichst breit angelegten Datensammlung wurden ausgesprochene Baudenkmäler und Gebäude mit vielen verschiedenen Gesteinsarten nicht durch eine besonders eingehende Beschreibung "aufgewertet". Komplexe wie das Neue Rathaus oder die Epitaphienreihen an Dom und Peterskirche beispielsweise wurden überschlagsmäßig behandelt.
- Durch Reinigungs-, Renovierungs-, Umbau- und Neubaumaßnahmen muß in der Innenstadt mit einer z.T. raschen Veränderlichkeit im Bestand und Zustand der Naturwerksteine gerechnet werden.

2.3. Auswertung der Allgemeinen Stadtkartierung

Der Kartiertext beschreibt den Naturwerksteinbestand der Stadt weitgehend in seiner der Wirklichkeit entsprechenden Komplexität. Um mit dem Material weiter arbeiten zu können, muß es entwirrt werden durch Ordnen nach verschiedenen Klassifizierungen. Im folgenden werden zunächst Angaben gemacht über das Ausmaß der Natursteinverwendung, dann werden die aus Naturstein gefertigten Bauteile nach Qualität und Häufigkeit vorgestellt und schließlich die beteiligten Gesteinsarten und die daran abzulesenden Verwitterungserscheinungen besprochen.

2.3.1. Gebäudebestand

Das bearbeitete Gebiet der Innenstadt umfaßt eine Fläche von 2,27 km² (vergleichbar einem Quadrat von 1,5 km Kantenlänge). Das gesamte Stadtgebiet erstreckt sich derzeit über 310,55 km² (vergleichbar einem Quadrat von 17,6 km Kantenlänge). Der behandelte Ausschnitt macht demnach nur 0,73 % der gesamten Stadtfläche aus, enthält aber mit der Altstadt den für die Natursteinverwendung nach Häufigkeit, Vielfalt und Historie wichtigsten Teil der Stadt.

Die straßenseitigen Fassadenfronten der im Gebiet befindlichen Gebäude addieren sich zu einer Länge von 60 km. Eine einzige, vollständige Begehung des Arbeitsgebietes mit Anmarschwegen und unvermeidlichen Wiederholungen vieler Strecken stellt einen beträchtlichen physischen Aufwand dar.

Von den 1 156 gezählten Gebäuden bzw. Gebäudekomplexen - darunter nach Ausweisung der Stadtkarte knapp 100 öffentliche Gebäude und davon wiederum 16 Kirchen - weisen 772 Anwesen oder 66,8 % Fassadenteile aus Naturstein auf.

Viertel- bezeichnung (Bezirke)	Fläche der Viertel (km ²)	Anzahl der Gebäude	Gebäude- dichte (Anzahl pro 100 m ²)	Fassaden- länge (m)	durch- schnittl. Gebäude- länge (m)	Gebäude ohne Naturstein		
						Anzahl der Gebäude	Anteil	Fassaden- länge (m)
N (1 - 11)	0,215	59	2,7	3 940	67	21	35,6	2 035
K (1 - 25)	0,395	205	5,2	9 890	48	34	16,6	1 625
G (1 - 32)	0,315	299	9,5	11 485	38	119	39,8	4 815
H (1 - 13)	0,265	226	8,5	6 425	28	83	36,7	2 520
A (1 - 31)	0,240	232	9,7	8 515	37	106	45,7	4 115
WE (1 - 13)	0,408	68	1,7	8 475	125	4	5,9	1 350
IJ (1 - 3)	0,179	28	1,6	3 855	138	8	28,6	825
PR (1 - 3)	0,153	22	1,4	3 200	145	2	9,1	495
MA (1 - 3)	0,100	17	1,7	1 970	116	7	41,2	1 140
Altstadt (N - A)	1,430	1 021	7,1	40 255	39	363	35,6	15 110
Straßenzüge 19.Jh. (WE-MA)	0,840	135	1,6	17 500	130	21	15,6	3 810
Gesamt	2,270	1 156	5,1	57 755	50	384	33,2	18 920

Tab. 2: Gebäudezahlen im untersuchten Stadtgebiet mit Gebäudezahlen ohne Natursteinverwendung

Viertel- bezeichnung (Bezirke)	Gebäude mit Naturstein									
	insgesamt		Sockel + Fass.Teile aus Naturstein I		ED-Fassaden aus Naturstein II		EG-F. + Ob.Teile aus Naturstein III		Gesamtfassaden aus Naturstein IV	
	Anzahl der Gebäude	%-Anteil	Fassaden- länge (m)	Anzahl	Fassaden- länge (m)	Anzahl	Fassaden- länge (m)	Anzahl	Fassaden- länge (m)	Anzahl
N (1 - 11)	38	64,4	1 905	24	1 010	8	330	2	360	4
K (1 - 25)	171	83,4	8 265	59	3 405	51	1 870	15	815	46
G (1 - 32)	180	60,2	6 670	70	3 350	70	1 700	17	620	23
H (1 - 13)	143	63,3	3 905	39	1 010	53	1 085	14	505	37
A (1 - 31)	126	54,3	4 400	41	1 645	52	1 550	13	485	20
WE (1 - 13)	64	94,1	7 125	25	2 175	5	325	12	1 045	22
LU (1 - 3)	20	71,4	3 030	15	2 100	0	0	2	540	3
PR (1 - 3)	20	90,9	2 705	5	870	1	50	3	365	11
MA (1 - 3)	10	58,8	830	8	600	1	55	0	0	1
Altstadt (N - A)	658	64,4	25 145	233	10 420	234	6 535	61	2 785	130
Straßenzüge 19./Jh. (WE-MA)	114	84,4	13 690	53	5 745	7	430	17	1 950	37
Gesamt	772	66,8	38 835	286	16 165	241	6 985	78	4 735	167
										10 970

Tab. 3: Gebäudezahlen mit Natursteinverwendung im untersuchten Stadtgebiet
(die römischen Ziffern I - IV beziehen sich auf die Spezifizierung der Bauteile nach Tab. 5)

Die höchsten Bebauungsdichten treten in den Vierteln der eigentlichen Altstadt auf mit bis zu 10 Gebäuden pro Hektar, wie z.B. im Angerviertel; allerdings sind in der Altstadt nur bei 64 % der Gebäude Natursteine verbaut. Bei den vergleichsweise großzügig angelegten Straßenzügen des 19. Jahrhunderts mit Gebäudedichten zwischen 1 und 2 pro Hektar liegt der Anteil natursteintragender Gebäude bei 84 %.

Die Daten zum Gebäudebestand und zur Häufigkeit der Natursteinverwendung finden sich aufgelistet in den Tabellen 2, 3 und 4. Die 9 Teilgebiete N bis MA sind hierbei einzeln ausgewiesen. Die durch die römischen Ziffern I bis VIII gekennzeichnete Aufgliederung nach Art der Bauteile richtet sich nach dem Inhalt der Tabellen 5 und 6.

Tab. 4: Einzelstehende Objekte mit Natursteinverwendung
(die römischen Ziffern V-VIII beziehen sich auf die Spezifizierung der Bauteile nach Tab. 6)

Viertel- bezeichnung (Bezirke)	Einzelobjekte aus Naturstein				
	Anzahl der Denkmäler + Plastiken V	Anzahl der Brunnen V	Anzahl der 'Aufgänge VI	Anzahl sonstiger Teile * VII	Anzahl der Schrifttafeln + Epitaphien (Ep), VIII
N (1 - 11)	9	5	13	15	-
K (1 - 25)	14	10	13	11	5 + 113 Ep
G (1 - 32)	11	8	9	17	2 + 1 Ep
H (1 - 13)	2	3	7	8	3 Ep
A (1 - 31)	3	11	5	8	3 + 57 Ep
WE (1 - 13)	12	3	5	71	-
LU (1 - 3)	9	4	6	8	48
PR (1 - 3)	3	3	3	14	-
MA (1 - 3)	7	2	2	7	-
Altstadt (N - A)	39	37	47	59	10 + 174 Ep
Straßenzüge 19. Jh. (WE-MA)	31	12	16	100	48
Gesamt	70	49	63	159	58 + 174 Ep

* außer IX : Pontons, Prellsteine etc.

2.3.2. Bauteile aus Naturstein

In einer Großstadt wie München treten dem Beobachter die Bauteile aus natürlich entstandenen Werksteinen in einer fast unübersehbaren Vielfalt entgegen. Von Denkmalfiguren bis zu Prellsteinen, von einfachen, gesägten Fassadenplatten bis zu kunstvoll gearbeiteten Epitaphien, von Stufensteinen bis zu Säulenkapitellen finden sich alle nur denkbaren Beispiele von Steinbearbeitung und Steinverwendung.

Mit den folgenden Auflistungen (Tabellen 5 und 6) wird die Fülle an Bauteilen zu überschaubaren Gruppen zusammengefaßt. Die Beobachtungsdaten der Stadtkartierung wurden nach den hierbei getroffenen Einteilungen ausgezählt (Tabellen 3 und 4).

Von Beginn an wurde eine Teilung in

- a) Natursteinteile, die mit Gebäuden in Verbindung stehen
(Fassadenbekleidungen, Bodenbeläge, Stufen, figürliche Darstellungen an Fassaden etc.)

und b) einzeln stehende Objekte

(Denkmäler, Wandverkleidungen von Unterführungen etc.)

vorgenommen. Die im Zwischenbereich angesiedelten Teile (Portalvorbauten, Verbindungsmauern, Zierbrunnen an der Fassade etc.) wurden je nach dem vorherrschenden Eindruck zur einen oder anderen Gruppe gerechnet.

a) Gebäudeteile aus Naturstein

Die aus Naturstein gefertigten Teile wurden zu 4 Gruppen (I - IV) zusammengefaßt. Die Gruppen unterscheiden sich voneinander durch einen jeweils höheren Anteil an natursteinverkleideter Fassadenfläche.

Tab. 5: Gebäudeteile aus Naturstein

I Sockel und Fassadenteile aus Naturstein

allgemein: Teilstücke der Fassadenfläche

- Sockelleisten (nicht höher als 0,2 m)
- Sockel und Sockelstücke (höher als 0,2 m), auch in Passagen
- Fensterbänke
- Fenstergewände
- Fensterbrüstungen
- Türgewände
- Pfeilerverkleidungen
- Wand- und Gesimsstreifen
- Portalteile (Sockel, Seitenpodeste, Pfeiler, Säulen,
Dachgebälk, Balkone, Balustraden)

II Erdgeschoß-Fassaden aus Naturstein

Die Fassadenfläche des Erdgeschosses ist vollständig mit Naturstein verkleidet oder ganz daraus aufgebaut. Inbegriffen sind Wand- und Deckenverkleidungen von Passagen. Die Fassadenflächen der oberen Geschosse tragen keine Natursteinteile.

III Erdgeschoß-Fassaden und Teile der oberen Fassade aus Naturstein

Die Fassadenfläche des Erdgeschosses ist vollständig mit Naturstein verkleidet oder daraus aufgebaut; dazu kommen Natursteinteile an der oberen Fassadenfläche:

- Fenstergewände
- Fensterbrüstungsverkleidungen
- Wand- und Gesimsstreifen
- Erker, Balkone
- Figürlicher Fassadenschmuck
- Gesamte Fassadenfläche des 1. Obergeschosses

IV Gesamtfassaden aus Naturstein

Die gesamte Fassadenfläche eines mehrstöckigen Gebäudes ist vollständig mit Naturstein verkleidet oder daraus aufgebaut (in Einzelfällen mit Ausnahme des Erdgeschosses).

Bei den Gebäudezahlen in Tabelle 3 ist so verfahren, daß die unter höheren Gruppenziffern eingeordneten Gebäude die Bauteile der niederen Gruppen jeweils mit einschließen.

In der Aufzählung fehlen Bodenbeläge und Stufen. Bodenbeläge aus Naturstein kommen in aller Regel an Gebäuden vor, die auch andere Natursteinteile an der Fassade aufweisen, und erscheinen in Tabelle 3 in den entsprechenden Rubriken. Gebäude, die einzig Stufen oder Schwellen aus Naturstein besitzen, sind unter die Zahlen der "Gebäude ohne Naturstein" in Tabelle 2 aufgenommen.

b) Einzelstehende Objekte aus Naturstein

Bei den einzeln stehenden Objekten aus Naturstein ist die Palette der Anwendungsmöglichkeiten noch viel breiter gefächert als bei den Fassadenteilen. In der Fachliteratur über Städtebau finden sich als übergeordnete Begriffe dieser Gruppe von Bauteilen mitunter die Ausdrücke: "Stadtmöblierung" und "Sekundärarchitektur".

Tab. 6: Einzelstehende Objekte aus Naturstein

V Denkmäler, Brunnen, Plastiken

(In Tabelle 4 ist die Zahl der Brunnen jeweils gesondert aufgeführt; vom Charakter der Steinverwendung her besteht jedoch kein wesentlicher Unterschied zu den Denkmälern und Plastiken.)

Denkmäler und Plastiken - Bauteile aus Naturstein

- Denkmalsockel und -sockelstufen
- Denkmalfiguren
- Schrifttafeln, Medaillons, sonstige Zierteile
- Komplexe Anlagen mit Stufen, Bodenbelag, Balustraden, Wandverkleidungen, Podesten, Säulen, Figuren
(z.B. Mariensäule; Kriegerdenkmal im Hofgarten; Friedensengel-Anlage)

Brunnen - Bauteile aus Naturstein

- Brunnensteine (randliche Begrenzung und Bodenbelag um Brunnenbecken)
- Brunnenschale
- Brunnenaufbau, Zierteile
- Brunnenstele
- Figuren
- Stufen

VI Aufgänge aus Naturstein

- Wand- und Brüstungsverkleidungen an Aufgängen von Fußgänger-Unterführungen, Straßen-Unterführungen, Zugängen zur U-Bahn und S-Bahn

VII Sonstige Teile aus Naturstein

- Brüstungsverkleidungen (insbesondere Brückenbrüstungen)
- Ziermauern und Verbindungsmauern zwischen Gebäuden mit Sockeln, Mauerwerk, Pfeilern, Ausfachungen, Abdeckungen, Figuren
- Torbauten (z.B. Maxtor)
- Podeste
- Sitzbanksockel
- Figurenschmuck und Skulpturen an der Fassade (soweit nicht zur Fassadengestaltung gezählt)
- Gartenmäuerchen
- Bodensteine um Kellerfensteröffnungen
- Gartenpfosten; Pfosten von Garageneinfahrten
- Laternensockel; Fahnenstangensockel

VIII Schrifttafeln und Epitaphien aus Naturstein

- Namensschilder
- Gedenktafeln
- Epitaphien

IX Sonstige, kleine Teile aus Naturstein

Sie wurden aufgrund ihrer kaum mehr abzuzählenden Vielfalt nicht Tabelle 4 aufgeführt.

- Blumenkästen
- Prellsteine
- Pontons

2.3.3. Verwendete Gesteinsarten

Die bisherige Aufgliederung nach den verschiedenen Bauteilen aus Naturwerkstein (vgl. 2.3.2.) zeigte die Vielseitigkeit der Gesteinsverwendung. Bezieht man die verschiedenen Gesteinsarten mit in die Betrachtung ein, so fächert sich das Bild um ein Vielfaches weiter auf.

Während der Kartiertätigkeit wurden die verbauten Gesteinsarten allein nach den Möglichkeiten der visuellen Ansprache bestimmt, und zwar zunächst ohne Rücksichtnahme auf eine später zu treffende Klassifikation. Anfängliche Unsicherheiten der Ansprache wurden im Verlauf der Wiederholungskartierung korrigiert.

Die recht lange Liste von kartierten Gesteinsarten und -varietäten wurde durch Zusammenfassen eingeengt auf 34 Gesteinsgruppen. Dabei wurden 17 Gruppen dem Bereich "Carbonatgesteine und kristalline Marmore", 11 Gruppen den "silikatischen Kristallingesteinen" und 6 Gruppen den "klastischen Sedimentgesteinen" zugeordnet. Eine kurze Beschreibung der die Gruppen bildenden Gesteinsarten ist in Kapitel 3 gegeben.

Die Gliederung nach Gesteinsgruppen versucht, dem Natursteinbestand der Stadt einigermaßen gerecht zu werden, indem einerseits wichtige Gesteinsarten jeweils durch eine eigene Gruppe repräsentiert sind, andererseits die Überschaubarkeit gewahrt bleibt durch zusammenfassende Behandlung der für München weniger bedeutenden Sorten.

Klassifikationen dieser Art werden immer zu einem Teil unbefriedigend bleiben. Weder können die Erfordernisse einer petrographisch klaren Teilung ganz erfüllt werden, noch darf man den Vorstellungen des Natursteinhandels, besonders was die Steinbezeichnungen angeht, zu stark entgegenkommen. Eine sehr detaillierte und ausführliche Aufgliederung erschwert durch Rücksichtnahme auf zu viele Einzelaspekte die Auswertungs- und Darstellungsarbeit.

REIS (1935) benötigte in seinem Buch: "Die Gesteine der Münchner Bauten und Denkmäler" 110 einzelne Abschnitte, um die Vielfalt der damals verbauten Steinsorten angemessen abhandeln zu können. GELDHAUSER (1982) zählt ca. 250 Bezeichnungen von Gesteinsarten und -varietäten auf, die im Innenstadtbereich Münchens vertreten sind. MÜLLER (o.J.) schließlich bildet in seiner "Internationalen Natursteinkartei" ("INSK") über 1000 unterschiedliche Gesteine ab, die im Steinhandel derzeit zum großen Teil erhältlich sind. Ein allen Anforderungen genügendes Gliederungssystem der Werksteine existiert bislang nicht. Man wird sich im konkreten Fall von den Erfordernissen der jeweiligen Zielsetzung leiten lassen müssen.

Carbonatgesteine und kristalline Marmore machen über die Hälfte des Natursteinbestandes der Innenstadt Münchens aus; auf die silikatischen Kristallingesteine entfällt ein Drittel der Vorkommen, und nur zu etwas mehr als 10 %

Hauptgesteinsarten	Zahl der Vorkommen	%-Anteile
Carbonatgesteine und kristalline Marmore	2 365	55,8
Silikatische Kristallingesteine	1 355	31,9
Klastische Sedimentgesteine	522	12,3
Zusammen	4 242	100,0

Tab. 7: Häufigkeiten der Naturwerksteinvorkommen
(Hauptgesteinsarten - alle Bauteile)

Da an einem Objekt oft mehrere Gesteinsarten verbaut sind, übertrifft die Gesamtzahl von 4 242 Vorkommen die Zahlen der in den Tabellen 3 und 4 verzeichneten natursteintragenden Gebäude, Objekte und Bildwerke. Die Vorgehensweise bei der Ermittlung der Häufigkeiten ist in Abschnitt 2.3.4. näher erläutert.

Bei der Aufgliederung nach einzelnen Gesteinsgruppen (Tabelle 8) zeigt sich, daß Granite, Muschelkalk und Donaukalk zusammen bereits die Hälfte aller Vorkommen stellen. Die aus dem traditionellen Münchner Einzugsgebiet (Bayern, österreichischer und italienischer Alpenraum) stammenden Gesteine (Granite, Muschelkalk, Donaukalk, Nagelfluh, Treuchtlinger Kalk und Knollenkalk) besitzen einen Anteil an der Gesamthäufigkeit von über 66 %. Nimmt man die übrigen, zu jeweils weniger als 2 % verbauten bayerischen Gesteinsarten wie Frankendolomit, Solnhofener Kalk, Kalktuff, Untersberger, Rosenheimer und Enzenauer Kalk, Suevit und die verschiedenen Sandsteine hinzu, so kommt man auf einen Anteil der "heimischen" Gesteine am Stadtbild von über 75 %.

Gesteinsgruppe	Zahl der Vorkommen	%-Anteile
1. Granite	952	22,4
2. Muschelkalk	822	19,4
3. Donaukalk	307	7,3
4. Bayer. Nagelfluh	294	6,9
5. Travertin	273	6,4
6. Treuchtlinger Kalk	236	5,6
7. Knollenkalk	219	5,2
8. Gneise	161	3,8
9. Sonstige Carbonate *	127	3,0
10. Ceppo-Nagelfluh	123	2,9
11. Kristalline Marmore	86	2,0
Rest (23 Gesteinsgruppen)	642	15,1
Zusammen (34 Gruppen)	4 242	100,0

Tab. 8: Häufigkeiten der Naturwerksteinvorkommen
(Gesteinsgruppen - alle Bauteile)

/* vgl. Abschnitt 3.1.6.

2.3.4. Bauteile und Gesteinsarten

Eine Gesamtübersicht über die Vorkommen der 34 Gesteinsgruppen (im Sinne der in Kapitel 3 gegebenen Zuordnungen) und ihre Verarbeitung zu den verschiedenen Bauteilen zeigt Tabelle 9. Die Aufgliederung der Bauteile und Werkstücke wurde zur Verdeutlichung der bauteilspezifischen Verwendung von Naturstein hierbei etwas differenzierter vorgenommen als in den Tabellen 3 und 4, in denen die Häufigkeiten der natursteintragenden Gebäude und Objekte aufgeführt sind.

Die angegebenen Häufigkeiten sind als Zahlen von "Vorkommen pro Bauwerk" ausgedrückt, wobei gleichartige Bauteile eines Gebäudes (z.B. 7 Sockelstücke aus Granit) - unabhängig von ihrer Lage an eventuell unterschiedlich exponierten Fassadenseiten - als jeweils 1 Vorkommen gewertet wurden.

Als "Vorkommen" erscheinen demnach beispielsweise 4 Muschelkalk-Fensterbänke eines Gebäudes gleichwertig zu einer Fassadenverkleidung, die insgesamt aus 120 Marmorplatten besteht. Aber: An der Frauenkirche wurde mit dem Sockelgestein 1 Vorkommen von Nagelfluh verzeichnet, gleichzeitig einige Dutzend von Knollenkalk-Epitaphien, die sich zur Zeit der Kartierungsaufnahme dort befanden. Man erhält eine richtige Vorstellung von der Bedeutung der Zahlen, wenn man annimmt, daß jedes einzelne "Vorkommen" für eine Entscheidung eines Bauherren steht, eine bestimmte Bauteilart in der entsprechenden Gesteinsart ausführen zu lassen. Über die tatsächlich verbaute Menge von Gesteinsmaterial sagen die Zahlen daher nur wenig aus.

Auf diese Weise wurden über 4 200 nach Bauteil- und Gesteinsarten unterschiedliche Vorkommen von Werksteinen an den 772 natursteintragenden Gebäuden, an 119 Denkmälern, Plastiken und Brunnen, an den etwa 60 Aufgängen von Unterführungen sowie an über 1 000 weiteren Objekten wie Schrifttafeln, Epitaphien, Brückenbrüstungen, Laternensockeln, Gartenpfosten, Blumenkästen, Pontons etc. festgestellt.

Das Zahlenwerk der Tabelle 9 beruht auf Beobachtungen der Jahre 1980 bis 1984. In gewissem Umfang muß mit einer beständigen Wandlung des Natursteinbestandes der Stadt gerechnet werden, verursacht durch Abbruch, Neu- und Umbaumaßnahmen, wodurch sich der wirkliche Bestand allmählich von dem 1984 festgeschriebenen und hier vorgestellten entfernen wird.

	Gesamtzahl	Sockel	Tür- u. Fenster- gewände	Portalteile	Fassaden- teile	EG-Fassaden + 1. Stock	Gesamt- fassaden	Wandverkl. von Passagen	Boden- beläge	Stufen, Schwellen	Denkmäler, Brunnen, Plastiken	Fußgänger- Aufgänge	Schrift- tafeln	Sonstige Teile	Blumenkästen, Prellsteine, Pontons
Muschelkalk	822	177	86	25	65	134	43	43	39	87	21	3	1	43	ca. 55
Donaukalk	307	34	40	17	23	52	46	14	18	24	21	-	2	11	ca. 5
Travertin	273	32	29	-	23	63	36	16	19	30	4	-	-	2	ca. 19
Trechtlinger Kalk	236	24	23	-	8	41	32	28	42	34	2	1	-	1	-
Krollenkalk	219	7	6	19	2	3	1	2	19	5	11	-	140	1	ca. 3
Sonstige Carbonate	127	13	1	6	5	18	2	19	12	9	2	-	37	3	-
Kristalline Marmore	86	6	4	-	2	10	8	14	22	7	10	-	1	-	ca. 2
Frankendolomit	80	21	8	1	10	18	3	-	5	7	2	4	-	-	-
Kalktuff	80	26	8	14	12	2	1	1	2	-	4	-	-	9	ca. 1
Wallenfels-Kalk	40	12	3	3	3	2	1	7	7	2	-	-	-	-	-
Solnhofener Kalk	31	1	2	-	-	-	-	7	20	-	-	-	1	-	-
Botticino-Kalkstein	20	1	1	-	4	2	1	-	8	3	-	-	-	-	-
Untersberger Kalk	18	2	-	2	3	-	1	-	-	2	7	-	-	-	ca. 1
Devonkalke	10	2	2	-	1	1	2	2	1	1	-	-	-	-	-
Zola-Repen-Kalkstein	9	-	2	-	-	2	-	-	4	1	-	-	-	-	-
Rosenheimer Kalk	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	-	-	-	ca. 2
Enzenauer Kalk	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-
Granite	952	131	9	6	9	15	7	7	51	413	51	8	1	35	ca. 209
Gneise	161	18	7	-	-	10	4	7	39	65	4	6	-	-	ca. 1
Dunkle magn. Gesteine	80	4	-	-	-	2	-	1	2	2	-	-	48	-	-
Serpentin	52	6	1	-	9	19	4	6	1	4	1	-	-	1	-
Kristalline Schiefer	37	2	-	-	5	7	2	4	16	1	-	-	-	-	-
Glimmerschiefer	32	-	-	-	6	13	1	3	6	3	-	-	-	-	-
Basalt-Lava	26	4	1	-	3	3	1	2	9	2	1	-	-	-	-
Larvikit	13	2	-	-	4	2	-	1	4	1	-	-	-	-	-
Trachyt-Tuff	10	1	-	-	-	2	-	2	4	1	-	-	-	-	-
Suevit	9	2	1	3	-	1	2	-	-	-	-	-	-	1	-
Porphyrit	3	-	-	-	-	-	-	-	2	-	-	-	-	-	-
Bayer. Nagelfluh	294	35	10	1	5	18	5	7	2	7	12	5	-	14	ca. 173
Ceppo-Nagelfluh	123	10	9	-	2	41	13	7	1	3	-	36	-	1	-
Sonstige Sandsteine	80	8	2	5	5	7	20	-	-	4	6	-	-	3	-
Grünsandstein	29	5	-	2	8	5	4	-	-	2	1	-	1	1	-
Buntsandstein	12	1	1	-	3	-	4	-	1	-	-	-	-	2	-
Tonschiefer	4	3	-	-	1'	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Zusammen	4242	590	256	104	222	493	242	200	356	719	165	63	232	129	ca. 471

Tab. 9: Naturwerksteinbestand der Münchner Innenstadt (zur Aufgliederung der Gesteinsarten vgl. Kap. 3)

In den Tabellen 10 bis 15 sind Rangfolgen von Gesteinsgruppen aufgestellt, die sich auf die bauteilspezifische Verwendung von Naturstein beziehen. Es ergeben sich mehr oder weniger große Unterschiede zu der in Tabelle 8 zum Ausdruck kommenden Rangfolge für die Natursteinverwendung insgesamt. Gründe hierfür sind die unterschiedlichen Eignungen der Gesteinsarten für verschiedene Verwendungszwecke, aber auch die Tradition, der Zeitgeschmack, der Stand der Verarbeitungstechnik sowie die jeweilige Angebotspalette des Natursteinhandels.

Aufgeführt sind im einzelnen:

Tabelle 10 Fassadenverkleidungen

Alle an der vertikalen Fassadenfläche verbauten Teile; dazu die Wandverkleidungen von Passagen.

Tabelle 11 Bodenbeläge

Häufig sind mehrere Gesteinsarten an der Ausgestaltung eines Bodenbelages beteiligt. Stufensteine aus dem gleichen Material wie ein angeschlossener Bodenbelag wurden nicht gesondert als "Stufen" gewertet.

Tabelle 12 Stufen und Schwellen

Stufen in Verbindung mit Bodenbelägen aus Naturstein wurden nur gewertet, sofern sie aus einem anderen Material bestehen.

Tabelle 13 Denkmäler, Brunnen und Plastiken

Alle Steinbauteile gewertet, auch Sockelstufen.

Tabelle 14 Schrifttafeln und Epitaphien

Namensschilder, Gedenktafeln, Epitaphien; aufgeführt sind alle festgestellten Einzelobjekte.

Tabelle 15 Wand- und Brüstungsverkleidungen von Unterführungen

37 U-Bahn- bzw. S-Bahn-Abgänge,
21 reine Fußgänger-Unterführungen,
5 Straßen-Unterführungen.

Der in der 3. Spalte der Tabellen jeweils aufgeführte "%-Anteil innerhalb der Gesteinsgruppe" kann ein Maß sein für die Eignung und/oder die Beliebtheit der Gesteinsart in Bezug auf die gerade betrachtete Bauteilverwendung.

Fassadenverkleidungen (Tabelle 10)

Als Werksteinteile an den vertikalen Fassadenflächen der Gebäude finden fast alle 34 Gesteinsgruppen Verwendung. Ausnahmen sind der Rosenheimer und der Enzenauer Kalk als ausgesprochene Denkmalgesteine sowie die an wenigen Stellen der Stadt als Bodenbelag verarbeiteten Porphyrite.

Die Granite, welche bei der Addition aller Vorkommen die am stärksten vertretene Gesteinsgruppe darstellen, stehen bei den Fassadenverkleidungen an 4. Stelle; nur knapp 20 % der Granitvorkommen befinden sich an Fassadenflächen, meist als massive Sockelquader an Gebäuden aus der Gründerzeit. Erst seit wenigen Jahren werden Granite auch für Gesamtverkleidungen von Gebäuden herangezogen, so z.B. beim Kaufhof am Marienplatz (1972), bei der Bayerischen Versicherungskammer, Maximilianstr. 53 (1972) oder beim Neubau Sendlinger Str. 37 (1980).

Als beliebtester Stein für die Fassadengestaltung erweist sich der Muschelkalk, sowohl bei modernen Plattenverkleidungen, als auch bei den gemauerten Fassaden von Geschäftshäusern aus der Gründerzeit, die z.T. mit reichem Fassadenschmuck versehen sind: Kaufhaus Hirmer, Kaufingerstr. 22 (1914); Kaufhaus Oberpollinger, Neuhauser Str. 44 (1905); u.v.a.m.

Auch der größte Teil der Vorkommen von Donaukalk befindet sich an den Fassadenflächen. Hier läuft die Verwendung fast ungebrochen durch von den Repräsentationsbauten des 19. Jahrhunderts (Feldherrnhalle 1844; Ludwigskirche 1844; Sie-

Gesteinsgruppe	Zahl der Vorkommen	%-Anteile	%-Anteil innerhalb der Gesteinsgruppe
1. Muschelkalk	573	27,2	69,7
2. Donaukalk	226	10,7	73,6
3. Travertin	199	9,5	72,9
4. Granite	184	8,7	19,3
5. Treuchtlinger Kalk	156	7,4	66,1
6. Ceppo-Nagelfluh	82	3,9	66,7
7. Bayer. Nagelfluh	81	3,9	27,6
8. Sonstige Carbonate *	64	3,0	50,4
9. Kalktuff	64	3,0	80,0
10. Frankendolomit	61	2,9	76,3
Rest (21 Gesteinsgruppen)	417	19,8	
Zusammen (31 Gruppen)	2 107	100,0	

Tab. 10: Fassadenverkleidungen (* vgl. Abschnitt 3.1.6.)

gestor 1852), über die Bauten aus der Gründerzeit (Künstlerhaus am Lenbachplatz 1900; Neues Rathaus 1908), Bauten aus dem 3. Reich (heutige Musikhochschule, Arcisstr. 12, 1935; Haus der Kunst 1937) bis hin zu modernen Fassadenbekleidungen (Rechenzentrum der TU, Gabelsbergerstraße, 1964).

Weitere Gesteine, die überwiegend zur Fassadengestaltung genutzt wurden, sind Travertin und Treuchtlinger Kalk, beide allerdings erst in der Zeit nach dem 2. Weltkrieg und ausschließlich in Form von Plattenverkleidungen.

Bodenbeläge (Tabelle 11)

Bodenbeläge werden gern mit einem gewissen repräsentativen Anspruch aus Naturstein gestaltet. Entsprechend finden sich zu diesem Zweck häufig farblich ansprechende Gesteinsarten ausgewählt und diese in poliertem Zustand verarbeitet. Dies verträgt sich nicht immer mit der Forderung nach Widerstandsfähigkeit gerade der Bodenplatten gegenüber mechanischem Angriff durch Abrieb, Belastung und Frost sowie gegenüber den Streusalzangriffen.

Spezialgesteine für Bodenbeläge sind der Solnhofener Kalk und die kristallinen Schiefer. Beliebt, mit Anteilen innerhalb der Gesteinsgruppen zwischen etwa 20 und 25 %, sind weiterhin Treuchtlinger Kalk, Gneise, und kristalline Marmore. Granite und Muschelkalk sind ebenfalls häufig anzutreffen; bei ihnen macht die Verwendung als Bodenbelag aber nur jeweils 5 % ihrer gesamten Vorkommenszahlen aus.

Gesteinsgruppe	Zahl der Vorkommen	%-Anteile	%-Anteil innerhalb der Gesteinsgruppe
1. Granite	51	14,3	5,4
2. Treuchtlinger Kalk	42	11,8	17,8
3. Muschelkalk	39	11,0	4,7
4. Gneise	39	11,0	24,2
5. Kristalline Marmore	22	6,2	25,6
6. Solnhofener Kalk	20	5,6	64,5
7. Travertin	19	5,3	7,0
8. Knollenkalk	19	5,3	8,7
9. Donaukalk	18	5,1	6,1
10. Kristalline Schiefer	16	4,5	43,2
Rest (17 Gesteinsgruppen)	71	19,9	
Zusammen (27 Gruppen)	356	100,0	

Tab. 11: Bodenbeläge

Stufen und Schwellen (Tabelle 12)

Von den 719 Vorkommen an Stufen und Schwellen bestehen fast 60 % aus Granit. Auch fast die Hälfte aller Granitanwendungen stellen Stufen dar. Ebenfalls einen hohen Anteil an den Stufensteinen besitzen die Gneise, sowohl bauteil-, als auch gesteinspezifisch. In den Zahlen dieser beiden dichten, kristallinen Gesteinsarten drückt sich ihre besondere Widerstandsfähigkeit gegenüber mechanischem Abrieb aus. Ungeachtet ihrer Eignung sind beliebt: Muschelkalk, Treuchtlinger Kalk und Travertin.

Gesteinsgruppe	Zahl der Vorkommen	%-Anteile	%-Anteil innerhalb der Gesteinsgruppe
1. Granite	413	57,4	43,4
2. Muschelkalk	87	12,1	10,6
3. Gneise	65	9,0	40,4
4. Treuchtlinger Kalk	34	4,7	14,4
5. Travertin	30	4,2	11,0
6. Donaukalk	24	3,3	7,8
7. Sonstige Carbonate *	9	1,3	7,1
8. Frankendolomit	7	1,0	8,8
9. Kristalline Marmore	7	1,0	8,1
10. Bayer. Nagelfluh	7	1,0	2,4
Rest (15 Gesteinsgruppen)	36	5,0	
Zusammen (25 Gruppen)	719	100,0	

Tab. 12: Stufen und Schwellen (* vgl. Abschnitt 3.1.6.)

Denkmäler, Brunnen, Plastiken, Schrifttafeln (Tabellen 13 und 14)

Bei den durch mehr oder weniger künstlerische Ausgestaltung herausgehobenen Bauteilen der Denkmäler, Brunnen und Plastiken stehen diejenigen 4 Gesteinsgruppen zahlenmäßig an der Spitze, die auch die Rangfolge der Gesamtvorkommen aller Bauteile (Tabelle 8) anführen: Granite, Donaukalk, Muschelkalk und Bayerische Nagelfluh. Erst auf den weiteren Plätzen erscheinen die nach ihrem Erscheinungsbild als wirkliche "Ziergesteine" anzusprechenden Knollenkalke, kristallinen Marmore, Untersberger Kalk, Rosenheimer und Enzenauer Kalk sowie die verschiedenen Sandsteine.

Gesteinsgruppe	Zahl der Vorkommen	%-Anteile	%-Anteil innerhalb der Gesteinsgruppe
1. Granite	51	30,9	5,4
2. Donaukalk	21	12,7	6,8
3. Muschelkalk	21	12,7	2,6
4. Bayer. Nagelfluh	12	7,3	4,1
5. Knollenkalk	11	6,7	5,0
6. Kristalline Marmore	10	6,1	11,6
7. Untersberger Kalk	7	4,2	38,9
8. Sonstige Sandsteine *	6	3,7	10,0
9. Kalktuff	4	2,4	5,0
10. Travertin	4	2,4	1,5
Rest (9 Gesteinsgruppen)	18	10,9	
Zusammen (19 Gruppen)	165	100,0	

Tab. 13: Denkmäler, Brunnen und Plastiken (* vgl. Abschnitt 3.3.3.)

Etwas einseitig ist der Gesteinsbestand bei den Schrifttafeln und Epitaphien zusammengesetzt. Zur Zeit der Kartierung war allerdings eine Anzahl von Epitaphien der Frauenkirche und der Peterskirche zur Restaurierung abgenommen. Die meisten der kartierten Epitaphien waren aus roten Knollenkalken gefertigt; daneben kamen graue Kalke nordalpiner Herkunft und Solnhofener Kalke vor. Die recht hohe Anzahl von 48 Schrifttafeln aus "dunklem, magmatischen Gestein" (hier ein Olivingestein) befindet sich an einem einzigen Gebäude, der Akademie der Bildenden Künste.

Gesteinsgruppe	Zahl der Vorkommen	%-Anteile	%-Anteil innerhalb der Gesteinsgruppe
1. Knollenkalk	140	60,3	63,9
2. Dunkle magm. Gesteine	48	20,7	80,0
3. Sonstige Carbonate *	37	16,0	29,1
Rest (6 Gesteinsgruppen)	7	3,0	
Zusammen (9 Gruppen)	232	100,0	

Tab. 14: Schrifttafeln und Epitaphien (* vgl. Abschnitt 3.1.6.)

Wand- und Brüstungsverkleidungen von Unterführungen (Tabelle 15)

Von den 7 hier zu nennenden Gesteinsarten stellt die italienische Ceppo-Nagelfluh mit über der Hälfte der Bauteilvorkommen den höchsten Anteil. In jüngerer Zeit wird allerdings den Graniten der Vorzug vor den Carbonatgesteinen gegeben; neben italienischen und sogar kanadischen und US-amerikanischen Sorten erscheinen dabei auch wieder vermehrt bayerische Granite im Straßenbild.

Die 4 Verkleidungen aus Frankendolomit sowie die 1 Unterführung aus Treuchtlinger Kalk wurden in Anlehnung an benachbarte Fassadenverkleidungen gewählt, im einen Fall diente das Landwirtschaftsministerium in der Ludwigstr. 2, im anderen Fall das Vorhandensein von Malmkalken am Nationaltheater als Vorbild.

Eine Novität stellen Brüstungen aus Sichtbeton am Lenbachplatz (1984) dar.

Gesteinsgruppe	Zahl der Vorkommen	%-Anteile	%-Anteil innerhalb der Gesteinsgruppe
1. Ceppo-Nagelfluh	36	57,1	29,3
2. Granite	8	12,7	0,8
3. Gneise	6	9,5	3,7
4. Bayer. Nagelfluh	5	7,9	1,7
5. Frankendolomit	4	6,4	5,0
6. Muschelkalk	3	4,8	0,4
7. Treuchtlinger Kalk	1	1,6	0,4
Zusammen (7 Gesteinsgruppen)	63	100,0	

Tab. 15: Wand- und Brüstungsverkleidungen von Unterführungen

Sonstige Teile

Innerhalb der sehr vielseitig zusammengesetzten Gruppe von Natursteinobjekten, die mehr oder weniger unabhängig von Gebäuden errichtet sind und keinen Denkmalcharakter besitzen, dominieren zahlenmäßig die Granite, der Muschelkalk, die Bayerische Nagelfluh und der Travertin.

- Die Geländerbrüstungen der Brücke über den Eisbach (1890), der Luitpold-(1901) und der Maximiliansbrücke (1906) bestehen aus Muschelkalk.
- Bei einer Reihe von Ziermauern und Terrassenbalustraden wurden vorwiegend Muschelkalk, Donaukalk und Sandsteine verwendet.

- Torgewände wie das Maxtor (1805) oder das Hofgartentor mit seinen 4 Durchgängen (1956) sind aus Kalktuff bzw. Muschelkalk gefertigt; weniger bedeutende Durchgänge aus Travertin und Donaukalk.
- Figurenschmuck besonderer Art stellen die Marmorfiguren in den Giebelfeldern etwa der Glyptothek oder der Propyläen sowie in den Wandnischen der Glyptothek dar.
Etwas profanerer Figurenschmuck aus Muschelkalk zierte so manche Geschäftsfassade aus der Gründerzeit (Kaufhäuser Oberpollinger und Hirmer).
- Für den Bau von Gartenmäuerchen sind Bayerische Nagelfluh und Granite beliebt.
- Blumenkästen aus Naturstein beleben in letzter Zeit verstärkt das Straßenbild; sie bestehen in der Mehrzahl aus Brannenburger Nagelfluh, Graniten, Travertin und Muschelkalk.
- Pfostenpfeiler an Gärten und Garageneinfahrten wurden bevorzugt aus Granit und Donaukalk hergestellt,
- Pontons und Prellsteine bestehen häufig aus Graniten, Brannenburger Nagelfluh und Muschelkalk.
- Schließlich sind jene Steinteile aus Granit und Muschelkalk zu nennen, die als Treppenpodeste, als Sockelsteine um Kellerfensteröffnungen, als Laternen- und Fahnenstangensockel sowie als Sitzbänke in unterschiedlichen Ausführungen Verwendung gefunden haben.

2.3.5. Verwitterungszustand

Die Beobachtungen der Allgemeinen Stadtkartierung zum Zustand der Naturwerksteine fanden in vereinfachter Form Eingang in die Stadtkarte 2: "Verwitterungszustand" (Anlagen 2a und 2b).

Dabei wurden folgende Beschreibungen des Gesteins- und Verwitterungszustandes dargestellt:

- | | |
|------------------------------------|--|
| - neu | - leicht/stark abgewittert |
| - renoviert | - Verkrustung, Schalenbildung, Versinterung |
| | - Abplatzen, Ausbrüche |
| - leicht/stark verschmutzt | - Abgrusen, Absanden, Abbröckeln, Abblättern |
| - hell abgewaschen | - Feuchtigkeit |
| - gedunkelt | - Ausblühungen |
| - verfärbt (rostfarben/kupfergrün) | - mechanische Schäden |
| - ausgebleicht | - Kriegsschäden |

Eine Auswertung der Kartieraufzeichnungen in Richtung auf eine phänomenologische Klassifizierung der Verwitterungserscheinungen erbrachte eine Liste von etwa 75 Einzelercheinungen (Tabelle 16), die zusammengruppiert wurden nach den Erscheinungsweisen:

1. Bearbeitungsart der Oberfläche
2. Durchfeuchtung
3. Verfärbung und Entfärbung
4. Stoffanhaftung, Stoffneubildung, Stoffumbildung
5. Zerteilung und Materialverlust

Tab. 16: Verwitterungserscheinungen '1. Ordnung'

1. Bearbeitungsart der Oberfläche

1.1. Primäre Bearbeitungsart

- 1.1. 1. Bruchraue Oberfläche
- 1.1. 2. Bossierte Oberfläche
- 1.1. 3. Gespitzte Oberfläche
- 1.1. 4. Scharrierte, gebeilte Oberfläche
- 1.1. 5. Gestockte Oberfläche
- 1.1. 6. Geschurte Oberfläche
- 1.1. 7. Geflammte Oberfläche
- 1.1. 8. Gesägte Oberfläche
- 1.1. 9. Geschliffene Oberfläche
- 1.1.10. Polierte Oberfläche
- 1.1.11. Ausgekittete Hohlräume
- 1.1.12. Imprägnierte, lackierte Oberfläche
- 1.1.13. Farbanstrich, Putzauftrag

1.2. Renovierte Oberfläche

- 1.2. 1. Gesäuberte Oberfläche
- 1.2. 2. Sandgestrahlte Oberfläche
- 1.2. 3. Grob abgeschlagene Oberfläche
- 1.2. 4. Nachgestockte Oberfläche
- 1.2. 5. Ausbesserungen
- 1.2. 6. Auftrag von Imprägnierungsmitteln, Lacken, Farben oder Putz

2. Durchfeuchtung

- 2. 1. Kapillarwassersäume
- 2. 2. Hygroskopisch an Ausblühungssalze gebundene Feuchtigkeit
- 2. 3. Kondenswasserdurchfeuchtung
- 2. 4. Feuchtflecken an schadhafte Installationen (z.B. Regenableitungsrohre)
- 2. 5. Freiwerdende Baustofffeuchtigkeit
- 2. 6. Länger verbleibende Regennässe in groben Porenräumen, Schichtlagen, Rissen oder Werkstoffugen
- 2. 7. Spritzwasserfeuchtigkeit
- 2. 8. Feuchtflecken durch aufsteigende Grundfeuchte
- 2. 9. Sickerwasserfeuchtigkeit aus hinterfülltem Erdreich
- 2.10. Exkrementfeuchtigkeit (Hundeklos)
- 2.11. Bemoosung durchfeuchteter Gesteinszonen

3. Verfärbung und Entfärbung

- 3.1. Dunklung durch Schmutzauflagerungen (sofern nicht spezifiziert nach Art der Auflagerung)
- 3.2. Rostverfärbungen
 - 3.2.1. Autochthone Rostverfärbung, meist als Rosthöfe um Biotite oder Pyrite
 - 3.2.2. Allochthone Rostverfärbung
 - 3.2.2.1. Gleichmäßig flächige Rostverfärbung ohne erkennbaren Bezug zur Herkunft des Eisens
 - 3.2.2.2. Fleckige, bahnenartige oder flächige Rostverfärbung mit erkennbarem Bezug zur Herkunft des Eisens (z.B. ausrostende Eisenteile in der Umgebung des Werkstückes)
- 3.3. Allochthone kupfergrüne Verfärbungen, meist mit erkennbarem Bezug zu kupferhaltigen Metallteilen in der Umgebung des Werkstückes

3.4. Entfärbung

- 3.4.1. Flächige Ausbleichung ohne erkennbaren Bezug zu äußeren Faktoren
- 3.4.2. Flächige, zonenweise, bahnenartige oder fleckige Ausbleichung mit erkennbarem Bezug zu Kapillarwassersäumen, Spritzwasserzonen, Schlagregenseiten etc.

4. Stoffanhaftung, Stoffumbildung, Stoffneubildung

4.1. Verschmutzung

- 4.1.1. Vergrauung durch locker anhaftenden Straßenstaub
- 4.1.2. Ablagerung von Straßenstaub auf horizontalen Bauteilflächen
- 4.1.3. Schwärzung durch Rußbelag
- 4.1.4. Exkremente von Hunden und Tauben
- 4.1.5. Sonstige anthropogene Beschmutzungen (Aufschriften, Plakatleim, Putzmittel etc.)

4.2. Verkrustung

- 4.2.1. Schwärzung durch beginnende Gipsverkrustung ("Gipsanflug")
- 4.2.2. Gipsverkrustung
- 4.2.3. Kalksinterverkrustung
- 4.2.4. Sonstige Verkrustungen (Lackkrusten, Malachitkrusten etc.)

4.3. Ausblühungen (weiße, lockere Ausblühungen oder weiße, krustige Salzabscheidungen)

- 4.3.1. Ausblühungen in Kapillarwassersäumen (von Stauwasserlagen ausgehend)
- 4.3.2. Ausblühungen durch ausgelöste Baustoffsalze
- 4.3.3. Ausblühungen in Verbindung mit Gipsverkrustungen
- 4.3.4. Ausblühungen in Verbindung mit sonstigen Durchfeuchtungen

4.4. Organismenbesatz

- 4.4.1. Bemoosung
- 4.4.2. Flechtenanflug
- 4.4.3. Flechtenbesatz
- 4.4.4. Sonstige Besiedlung durch Organismen (Efeu, Gras, Insekten etc.)

5. Zerteilung und Materialverlust

5.1. Abwitterung

- 5.1.1. Hell abgespülte Oberfläche
- 5.1.2. Rauh angewitterte Oberfläche
- 5.1.3. Abgewitterte, ausgewitterte Oberfläche
- 5.1.4. Selektiv ausgewitterte Oberfläche
- 5.1.5. Abmehlen
- 5.1.6. Abgrusen, Absanden
- 5.1.7. Abblättern, Abschilfern
- 5.1.8. Abbröckeln
- 5.1.9. Ausbrüche, Abplatzungen, Abschalen

5.2. Abnutzung

- 5.2.1. Bodenbeläge, Stufen, Fensterbänke, Gewändeplatten, Geländerbrüstungen etc. allgemein abgenutzt (sofern nicht spezifiziert nach Art der Abnutzung)
- 5.2.2. Bodenbelag, Stufen ausgetreten
- 5.2.3. Schrammen, Kratzer
- 5.2.4. Trittspur, Berührungsspuren blank poliert
- 5.2.5. Sonstige Abnutzungsarten

5.3. Sonstige, mechanisch verursachte Schäden

- 5.3.1. Anriß, Durchriß von Gesteinen
- 5.3.2. Durchbruch, Abbruch von Gesteinstteilen
- 5.3.3. Ausbrüche von Gesteinsteilstücken
- 5.3.4. Kriegsschäden (Geschoßeinschläge, Zertrümmerungen, Brandschäden)
- 5.3.5. Biegung von Gesteinsplatten
- 5.3.6. Verkipfung von Werksteinen

Sinn dieser Aufstellung ist es, einen Katalog von kleinsten Verwitterungs-Einzelercheinungen ("Erscheinungen 1. Ordnung") vorzuschlagen, die, losgelöst von Zusammenhängen mit anderen Phänomenen, für sich allein definierbar sind. Durch Kombination dieser Einzelercheinungen sollte es möglich sein, die meist komplex zusammengesetzten wirklichen Verwitterungsbilder vollständig und objektiv beschreiben zu können. Als "Verwitterungserscheinungen" wurden hier - sehr weit gefaßt - die Bearbeitungsart und alle sichtbaren Veränderungen des Gesteinszustandes gegenüber seinem Neuzustand verstanden.

Mit den in Tabelle 16 aufgeführten Begriffen können natürlich nicht alle überhaupt möglichen Variationen von Verwitterungserscheinungen angesprochen werden. Die besonderen Arten der Schadensausformung sowie deren Lokalisierungen am Werkstück und deren Bezüge zur Bauwerksmorphologie müssen eigens notiert werden.

Als "Verwitterungserscheinungen 2. Ordnung" wären komplexe Erscheinungsbilder zu bezeichnen, die an bestimmte Verwitterungsvorgänge gebunden sind und sich im Verlauf der Zeit auf typische Weise fortentwickeln - etwa Kappillarwassersäume mit Ausbleichungen, Absandungen, Feuchtigkeitszonen, Ausblühungen etc.

Zu unterscheiden von den Erscheinungen 2. Ordnung sind zufällige Kombinationen von Erscheinungen 1. Ordnung, die sich unabhängig voneinander entwickeln und in keinem genetischen Zusammenhang zueinander stehen; z.B. die verschmutzte Oberfläche einer durch mechanische Einwirkung gebrochenen Fassadenplatte.

In Kapitel 6 dieser Arbeit werden 3 Beispiele von 'Verwitterungserscheinungen 2. Ordnung' vorgestellt:

- Schäden durch Ausblühungssalze im Sockelbereich von Gebäuden,
- 'Normalverwitterung' des Muschelkalks,
- Schalenverwitterung nordostbayerischer Granite.

3. BESCHREIBUNG DER WICHTIGSTEN WERKSTEINARTEN

Die in Abschnitt 2.3.3. angesprochenen 34 Gesteinsgruppen, in welche die in der Münchner Innenstadt beobachteten Werksteine eingeordnet wurden, bestehen jeweils teils aus einer einzigen, teils aber auch aus mehreren, weiter zu differenzierenden Gesteinsarten. Im folgenden werden die Gesteine jeder Gruppe nach Entstehung, Petrographie und Herkunft kurz beschrieben.

Die Reihenfolge der Gesteinsbeschreibungen innerhalb der 3 Großgruppen:

- Carbonatgesteine und kristalline Marmore
- Silikatische Kristallingesteine
- Klastische Sedimentgesteine

richtet sich nach der Häufigkeit der jeweiligen Vorkommen.

Auf Informationen, die auf REIS (1935), MÜLLER (o.J.) oder BGL (1984) basieren, wird im einzelnen nicht weiter hingewiesen.

3.1. Carbonatgesteine und kristalline Marmore

Polierfähige Kalke werden im Steinhandel allgemein als "Marmore" bezeichnet. Petrographisch sind die 'Kalksteine' als chemische Ausfällungsgesteine und biogene Massen jedoch streng von den metamorph überprägten, echten 'kristallinen Marmoren' zu unterscheiden. In dieser Arbeit wird der petrographisch richtigen Bezeichnung der Vorrang gegeben.

3.1.1. Muschelkalk

Die in München als "Muschelkalk" verbauten Gesteine entstammen fast ausschließlich der sog. "Quaderkalkfazies" des Oberen (Haupt-) Muschelkalks. Das Abbaugelände konzentriert sich heute vor allem auf die südwestlich von Würzburg gelegenen Orte Krenstein, Kirchheim, Kleinrinderfeld, Gaubüttelbrunn.

Der "Quaderkalk" besteht aus einer Anzahl von jeweils bis zu einigen Metern mächtigen Schill- und Bruchschillkalksteinbänken, die sich im Verbreitungsgebiet zwischen die Normalabfolge des höheren Oberen Muschelkalks schieben und die jeweiligen Normalschichten ersetzen (HOFFMANN 1967). Die Bänke werden von 2 aufeinander senkrecht stehenden Kluftscharen durchschlagen und zerfallen beim Abbau auf natürliche Weise in leicht gewinnbare, quaderförmige Klötze ("Quaderkalk").

Als Werksteine sind folgende Gesteinsausbildungen wichtig (DREXLER 1964):

- Der Kernstein aus zerriebenen Brachiopoden- und Muschelschalen, die umkristallisiert und durch Calcitcement fest miteinander verbunden sind. Größere Hohlräume sind häufig mit dichter, grauer Kalkmatrix ausgefüllt; sehr verbreitet sind limonitfarbene sog. "Ockerkalkschmitzen".
- Die Blaubank, deren in poliertem Zustand blau-graue Farbe durch reichlich Kalkfüllmasse zwischen den zurücktretenden Anteilen an Brachiopodenschill hervorgerufen wird.

- Die Goldbank mit einem ebensolchen Vorherrschen von feinkörniger, calcitischer Grundmasse, die durch Limoniteinlagerungen zusätzlich gelbbraun gefärbt ist.
- Der Schaumkalk mit seinen sehr fein zerriebenen Schalenbruchstücken, die dem Gestein ein feinporiges, "schaumiges" Aussehen verleihen.

Vorkommen in München:

- Lenbachplatz 8, Künstlerhaus (Terrasse)
- Kaufhaus Oberpollinger, Neuhauser Str. 44
- Prinzregentenbrücke und Maximiliansbrücke

3.1.2. Donaukalk

(Kelheimer Kalk; Auerkalk; Ihrler Kalkstein; Diceraskalk; Nerineenkalk)

"Donaukalk" steht als Sammelbegriff für die hellgelben, manchmal fast weißen Riffschuttkalke des obersten Juras (Malm Delta bis Zeta), wie sie vor allem im Gebiet um Kelheim an der Donau abgebaut werden. Größere Werksteinbrüche existieren heute bei Oberau (Auerkalk) und bei Marching.

Die sehr fossilreichen Gesteine treten in ganz unterschiedlichen Ausbildungen auf, die

- | | |
|------------|---|
| von | - massenkalknahen, dichten Partien, |
| über | - Grobschuttbänke mit größeren und oft rißartig erscheinenden Hohlräumen, |
| bis hin zu | - kalktuffartig-porösen Gesteinen |

reichen.

Vorkommen in München:

- Ludwigskirche (Ludwigstr. 20)
- Feldherrnhalle (Odeonsplatz)
- Haus der Kunst (Prinzregentenstr. 1)

Zum "Donaukalk" wurde bei der Allgemeinen Stadtkartierung auch der sog. "Eichstätter Kalk" gerechnet. Er ist eine zeitgleich mit dem Treuchtlinger Kalk im Malm Delta entstandene Bildung (REIS 1935) und wurde in der einige 10er Kilometer westlich von Kelheim gelegenen "Eichstätter Wanne" gewonnen. Im 19. Jahrhundert vor allem wurde das Gestein zusammen mit den Kelheimer Kalken verbaut und steht so seiner Verwendung nach dem Donaukalk näher als dem lange Zeit nur in Innenräumen genutzten Treuchtlinger Kalk.

Im Anschnitt senkrecht zur Schichtung zeigt der Eichstätter Kalk weißlich-graue, leicht wellige, horizontale Lagen (Stromatolithen), die in Abständen von einigen Zentimetern aufeinander folgen und sich nach oben hin kuppelartig oder in wolkenförmigen Formen jeweils auflösen. Die Zwischenräume sind erfüllt von teils hellerer, teils dunklerer Kalkmasse, in die größere Onkoide und vereinzelt Querschnitte von verkalkten Kiesel Schwämmen eingelagert sind.

Vorkommen in München:

- Sockelstufen der Glyptothek am Königsplatz
- Säulenstücke am Portal zum Nationaltheater (Max-Joseph-Platz)

3.1.3. Travertin

Bei den in München an vielen Hausfassaden anzutreffenden Travertinen dürfte es sich in den meisten Fällen um Römischen Travertin (Travertino Romano) handeln.

Es ist ein sehr liches, gleichmäßig hellgelb gefärbtes Gestein aus der Gegend um Tivoli, östlich von Rom. Andere Travertine stammen aus unterschiedlichen Herkunftsgebieten, vor allem aus Süd- und Südosteuropa. Sie besitzen meist eine intensivere Färbung als die Römischen Travertine, sind mitunter lebhaft in braunen, ockergelben, roten und grauen Tönungen gebändert. Ein kontrastreich gebändertes Gestein ist der Cannstätter Travertin aus Bad Cannstatt bei Stuttgart.

Vorkommen in München:

- Römischer Travertin: Viele Geschäftsfassaden aus der Nachkriegszeit
- Cannstätter Travertin: Kriegerdenkmal im Hofgarten

3.1.4. Treuchtlinger Kalk

(Treuchtlinger Marmor; Jura Gelb; Deutsch Gelb; Jura Grau)

Treuchtlinger Kalke werden in der südlichen Frankenalb zwischen Treuchtlingen und Dietfurt abgebaut. Sie entstanden im Malm-Delta als Bankkalke in den durch umlaufende Schwammriffkomplexe gebildeten Sedimentationswannen.

Typisch für die Gesteinsausbildung des Treuchtlinger Kalkes sind die in nicht streng voneinander getrennten Lagen in die meist hellere Kalkschlammatrix eingebetteten biogenen Anteile:

- Verkalkte, meist tellerförmige Kiesel Schwämme.
- Frei im Sediment gewachsene Algenkrusten.
- "Tubiphyten" (millimetergroße weiße Flecken innerhalb der Algenkrusten).
- Locker in der helleren Matrix verteilte Bruchstücke von Schwamm- und Algenkrusten, von Belemniten, Ammoniten, Brachiopoden.

"Jura Gelb" ist die Bezeichnung für das durch Oxidation gelbbraun gefärbte Gestein, "Jura Grau" die Handelsbezeichnung für das blaugraue, nicht oxidierte Material.

Vorkommen In München:

- Sehr viele Verkleidungen von Geschäftsfassaden der Nachkriegszeit

3.1.5. Knollenkalk

(Knollenmarmor; Rotmarmor; Adneter-, Trientiner-, Veroneser Marmor; Ammonitico Rosso; u.a.m.)

Die Gruppe der "Knollenkalke" beinhaltet alle jurassischen roten Knollenkalkgesteine, unabhängig von ihrer Herkunft. Für die Gebäudefassaden in München sind mengenmäßig von besonderer Bedeutung die südalpinen Abbaureviere von Trient und Verona, vereinzelt findet sich auch Material der Vorkommen von Ruhpolding und Tegernsee verbaut. Die Gesteine vom vielleicht bekanntesten Vorkommen, Adnet bei Salzburg, wurden im Außenbereich vorwiegend zur Gestaltung von Epitaphien und Bildwerken herangezogen.

Typische Gesteinsmerkmale sind die oft kräftigen roten Farben sowie die rundlich geformten, knolligen Absonderungen, die meist erst bei der Verwitterung der Gesteine deutlich in Erscheinung treten. Im einzelnen besteht eine große Vielfalt an unterschiedlichen Ausbildungen und Varietäten (GRIMM 1984b).

Ein besonders zu erwähnender Gesteinstyp ist der Tegernseer Kalk, der nicht im Lias, wie die meisten der roten Knollenkalke, sondern im Malm entstanden ist. Bei ihm wurden die von Calcitadern durchzogenen "Knollen" durch tektonische Beanspruchung ausgelängt und verfälscht.

Vorkommen in München:

- Trientiner Knollenkalk: Akademie der Bildenden Künste, Akademiestr. 2
- Tegernseer Knollenkalk: Portal des Preysing-Palais, Residenzstr. 27

3.1.6. Sonstige Carbonatgesteine

Diese Gruppe von Werksteinen umfaßt all jene Gesteinsarten, die aufgrund ihrer geringen Zahl von Vorkommen nicht eigens vorgestellt zu werden brauchen, und auch jene Gesteinstypen, die nicht eindeutig bestimmt werden konnten.

Nur einige der vielen Sorten seien hier angeführt:

- Belgischer Crinoidenkalk ("Belgisch Granit")
schwarz mit weißen Crinoidenstielgliedern;
- Savonnières-Kalk aus Frankreich
sehr heller, "schaumig" aussehender Oolithkalk;
- Portoro-Kalkstein aus Italien
Schwarzer Kalkstein, von hellfarbigen, manchmal orangegelb leuchtenden Calcitadern durchzogen.

An neueren Fassaden fällt eine Anzahl dichter und fossilführender Kalke auf, die zur Hauptsache wohl aus Italien und Jugoslawien stammen.

3.1.7. Kristalliner Marmor

Werksteine aus kristallinem Marmor kommen heute aus der ganzen Welt nach München; eine Zuordnung allein aufgrund ihres Aussehens zu den verschiedenen Herkunftsgebieten ist so gut wie unmöglich.

Namentlich zu nennen sind hier die als Denkmalgesteine seit alters her geschätzten, gleichmäßig weißen bis schwach grau gefärbten Marmore von Carrara in der Toscana und die etwas gröber körnigen von Laas bzw. Schlanders im Vintschgau westlich von Meran.

Vorkommen in München:

- Carrara: Figur des Pettenkofer-Denkmal
am Maximiliansplatz

3.1.8. Frankendolomit

Als Frankendolomit werden alle dolomitisierten Carbonatgesteine der Frankenalb bezeichnet. Als das Werkgestein "Frankendolomit" finden dagegen nur die dolomitisierten Äquivalente des Treuchtlinger Kalkes (Malm Delta) Verwendung.

Die bekanntesten Handelsnamen sind: Wachenzeller Dolomit aus dem gleichnamigen Ort, 8 km nördlich von Eichstätt gelegen, und Kleinziegenfelder Dolomit, der südlich von Burgkunstadt in Oberfranken gewonnen wird.

Die Dolomite besitzen eine feinkörnig kristallinische Struktur; zuweilen können sich luckig-poröse Hohlräume auftun. Bei der Dolomitisierung wurden die Fossilspuren im allgemeinen zerstört, zumindest verwischt. Die 'normale' Fär-

bung des Frankendolomits ist grau bis graublau; als Werksteine werden Partien mit gelblichen und honigbraunen Farben in dunklen und helleren Wolkungen bevorzugt. Sie entfalten am polierten Stück eine besondere Wirkung, wittern allerdings mit der Zeit zu einem einheitlichen Grau aus.

Vorkommen in München:

- Landwirtschaftsministerium, Ludwigstr. 2
- Marienplatz 1 und 2
(ehemals polierte Platten mit bräunlichen Farben).

3.1.9. Kalktuff

Die im Holozän entstandenen, hellgelben und grobporösen Kalktuffe aus der näheren Umgebung von München wurden als Bausteine seit frühesten Zeiten verwendet. Vorkommen gab es innerhalb der carbonatschotterreichen eiszeitlichen Ablagerungen genügend. Bekanntere Abbaue waren Glonn (östlich von München) sowie die bei Weilheim gelegenen Orte Polling und Huglfing.

Vorkommen in München:

- Maxtor am Westende der Prannerstraße

3.1.10. Wallenfels-Kalkstein

Von den zahlreichen, als Werksteine genutzten oberdevonischen Flaserkalken (Knollenkalken) findet sich an den Gebäudefassaden Münchens häufiger der "Wallenfels-Kalk" verbaut. Es ist ein wolkig hell- bis dunkelgrau durchfärbtes Gestein, durchsetzt von weißen Calcitklüften und schwarzen, tonig-bituminösen Stylolithenbahnen.

Vorkommen in München:

- Hypopassage (Wand- und Deckenverkleidung),
Kardinal-Faulhaber-Str. 10

3.1.11. Solnhofener Kalk

Plattenkalke des Malm-Zeta (Solnhofener Kalke) werden in der Umgebung von Eichstätt in der südlichen Frankenalb in zahlreichen Steinbruchbetrieben abgebaut. Die eben aufspaltenden Platten sind in Stärken von wenigen Millimetern bis zu Dezimeterdicke zu gewinnen. Die natürlichen Spaltflächen der Platten sind leicht rau, von hellgelber bis grau-beiger Farbe und enthalten oft Ausfällungen von Eisen- und Manganoxiden (Dendriten).

Lange Zeit wurde das exportierte Gestein außer für die Lithographie als Material für Schrifttafeln im Denkmalsbereich verwendet, heute zur Hauptsache als Platten für Bodenbeläge und Wandverkleidungen.

3.1.12. Botticino-Kalk

Dieser oberitalienische Kalkstein aus dem Lias wird bei Brescia, westlich des Gardasees, gebrochen.

Das feinkörnige und dichte Gestein ist gleichmäßig cremefarben getönt; fast jedes Stück enthält einige dunklere, sich verzweigende Stylolithenbahnen.

3.1.13. Untersberger Kalk

(Untersberger Marmor; Forellenstein)

Das Abbaugbiet des Untersberger Kalkes ist auf der nach Salzburg zugewendeten Nordseite des Untersberges in der Nähe der Orte Glanegg und Grödig gelegen.

Das helle und sehr reine Kalkgestein, bestehend aus meist eckigen Komponenten von Blockgröße bis herunter zu feinstem Korn, entstand als Basiskonglomerat der mittleren und oberen Gosauschichten in der Oberkreide. Kennzeichnend sind meist kleine bräunlich-rote, klastische Einsprenglinge, die dem Gestein insgesamt einen fleischfarbenen, warmen Farbton verleihen.

Vorkommen in München: - Propyläen am Königsplatz

3.1.14. Devonkalke

Unter der Bezeichnung "Devonkalke" werden die bunten Flaser- und Breccienkalke aus devonischen Ablagerungen des Frankenwaldes (z.B. Marxgrün bei Naila), des Rheinischen Schiefergebirges (Lahntal), Polens oder Frankreichs zusammengefaßt, die als Werksteine nach München gelangt sind.

Als eigene Gruppe werden die Wallenfels-Kalksteine in 3.1.10. beschrieben.

3.1.15. Zola-Repen-Kalkstein

Ein aus Kalkschlamm und Bruchschill aufgebautes, beigefarben bis hellgraues Kalkgestein aus Norditalien (Triest), bei dem besonders die lagenweise angeordneten, großen Schalenbruchstücke von Rudisten auffallen, die mal dunkler, mal heller gegen den Untergrund abgesetzt sind.

3.1.16. Rosenheimer Kalk

(Rosenheimer Granit; Granitmarmor; Lithothamnienkalk)

Der als Werkstein verwendete Rosenheimer Kalk gehört zu den im oberen Eozän auf der Intrahelvetischen Schwelle entstandenen Lithothamnienkalcken (HAGN in WOLFF 1973). Die Werksteine wurden südlich von Rosenheim, in Sinning bei Rohrdorf, gebrochen.

Im 19. Jahrhundert war der Rosenheimer Kalk ein beliebtes Material zur Gestaltung von Denkmälern, Epitaphien und Grabsteinen. Leider entpuppte er sich bald als sehr verwitterungsanfällig und ist heute in der Innenstadt Münchens fast nicht mehr vorhanden.

Die Bezeichnung "Granitmarmor" stellt eine Anspielung auf das granitähnliche Aussehen des Steines dar. Die Hauptmasse des zumeist gröber körnigen Fossil-schuttkalkes besteht aus umgelagerten Kalkknöllchen von Rotalgen (Lithothamnien). Die Farbe reicht von bläulichgrau über weißlichgrau bis gelblichgrau. Bei der Verwitterung geht der Zusammenhalt der Knöllchen rasch verloren, das Gestein 'grust' ab.

Vorkommen in München: - Sockelteile des Denkmals für Kurfürst Maximilian I. am Wittelsbacher Platz

Vorkommen bayerischer Granite in München:

- viele Sockelgesteine an Gebäuden der Gründerzeit
- Sockel des Alten Justizpalastes, Elisenstr. 1 (Waldstein Granit)
- Sockel der Neuen Pinakothek, Theresienstraße (Flossenbürg-Gelb)

Ein weiteres großes europäisches Kristallgebiet, Skandinavien, liefert bereits seit dem letzten Jahrhundert farblich besonders interessante Gesteine, die vorwiegend als Fassadenverkleidungen und Bodenbeläge Verwendung finden. Es sind meist kräftig rot gefärbte Gesteine mit entsprechend hohen Anteilen an Kalifeldspat. Einige Sortenbezeichnungen:

- BOHUS von der Westküste Schwedens nördlich von Göteborg
- TRANAS aus der Gegend westlich des Vätternsees in Südschweden
- GOTENROT von der schwedischen Ostküste gegenüber der Insel Gotland
- BALMORAL von der Südwestküste Finnlands

Schließlich sind die Rapakivi-Granite zu erwähnen, eine in Südfinnland verbreitete Serie von dunklen Gesteinen mit kugelig geformten Feldspatkrystallen. Von diesen, fälschlich auch als "Kugelgranit" bezeichneten Gesteinen hat in den 70er Jahren unseres Jahrhunderts besonders der Wiborgit ("Baltic braun") aus dem südlichen Grenzgebiet zwischen Finnland und der UdSSR in München Bedeutung erlangt. Er besitzt große, rundlich ausgebildete, rotbraune Kalifeldspäte, die von einem Saum aus graugrünem Plagioklas ummantelt sind. Zwischen den Feldspäten befindet sich reichlich schwarzer Biotit und nur wenig Quarz.

Vorkommen skandinavischer Granite in München:

- Erdgeschoß-Fassade Tal 66 (Tranas)
- Bodenbelag Briener Str. 1 (Wiborgit)

Von den übrigen, nur in jeweils wenigen Fällen in München verbauten Granitsorten seien genannt:

- Hornblendegranit ASSUAN (Ägypten), hellrot
Ägyptischer Obelisk, Hofgartenstraße
- Alkaligranit MEISSEN (DDR), dunkelrot
Sockel des Max-II-Denkmal, Maximilianstraße
- Tonalit REDWITZIT (Fichtelgebirge), dunkelgrau
Sockelstufen des Max-II-Denkmal, Maximilianstraße
Sockel des Max-I-Joseph-Denkmal, Max-Joseph-Platz
- Granit GERTLBACH (Schwarzwald), rötliche Feldspäte
Fassadenverkleidung Weinstr. 7 ("Salamander")
- Granit GABY (Portugal), hellgrau mit großen Feldspäten
Kaufhof am Marienplatz, Fassade
- Unakit KARDINAL (Südafrika), pegmatitischer Epidot-Syenit
wird angeordnete, leistenförmige, leuchtend rote Orthoklasen, dazwischen Epidot und Chlorit
St.-Benno-Brunnen, Frauenplatz (nördlich des Doms)
- Bostonit BETHEL WHITE (Vermont, USA), feinkörniger, fast weißer Aplit,
überwiegend aus Anorthoklas bestehend
- Granit MONTORFANO (Norditalien), sehr hell, mittelkörnig

3.2.2. Gneise

REIS (1935) konnte für die Zeit vor dem 2. Weltkrieg nur sehr wenige Beispiele zur Verwendung von Gneis als Naturwerkstein in München aufzeigen. Auch heute treten die grobkörnigen und meist hellen Gneise nicht stadtbildprägend in Erscheinung. Daß sie dennoch unter den 10 meist verbauten Werksteinarten der Stadt rangieren (vgl. Tab. 8), liegt an ihrer bevorzugten Verwendung als Stufen und Bodenbeläge.

Die vorhandenen Gneisgesteine stammen zum überwiegenden Teil wahrscheinlich aus den italienischen und schweizerischen Tessiner Alpen.

Farblich interessante Sorten für repräsentative Bodenbeläge und Fassadenverkleidungen kommen z.B. aus Schweden (KULLÖ) und aus der Ukraine (ORIENTA oder RUBINA).

3.2.3. Dunkle magmatische Gesteine

Hier sind alle plutonischen und vulkanischen Gesteine zusammengefaßt, die von sehr dunkler, überwiegend schwarzer oder dunkelgrüner Farbe sind und - im Gegensatz zu den vulkanischen Tuffen und Laven, die eigens besprochen werden - ein dichtes, fast hohlraumfreies Korngefüge besitzen.

An den 60 aufgeführten Vorkommen mögen beteiligt sein:

- Diorit, Gabbro, Tonalit
Hoher Anteil an mafitischen Mineralen (Amphibole, Pyroxene, Biotit); daher überwiegend schwarz gefärbt, weiße Flecken durch Feldspat
- Charnokit "Schwedisch Grün"
Dunkelolivgrün bis fast schwarz durch hohen Pyroxengehalt
- Basalt "Schwedisch Schwarz"
Rein schwarzes Ganggestein aus Südschweden mit eingestreuten, reflektierenden Erzkörnern.
- Proterobas
Lamprophyrgestein aus dem Fichtelgebirge.
Schwarze Grundmasse aus Pyroxen; eingestreut weiße Plagioklas-Nadelchen.
- Pikrit (Hessischer Olivindiabas aus dem Dillgebiet)
Schwarz-grüne Grundmasse aus Pyroxen und Olivin; hellgrüne Flecken in Form von Perlen, Flammen oder Wolken durch verwitterten Olivin.

3.2.4. Serpentinit

Serpentinite fallen auf durch ihre intensiv grüne Farbe, durch ihre meist grobbrecciöse Erscheinung und durch einen hohen Anteil an hellgrünem und weißem Calcit. Sie entstanden durch Metamorphose aus ultrabasischen, olivinreichen Gesteinen, insbesondere aus Peridotiten. Die Calcitmasse drang bei späteren tektonischen Beanspruchungen in Klüfte und Hohlräume ein.

Bedeutende Abbaue von Serpentin-Werksteinen befinden sich im Bereich des Aostatales im Grenzgebiet zwischen Italien, Frankreich und der Schweiz ("Verde alpi" bzw. "Vert des Alpes") sowie in Griechenland bei Larissa ("Verde antico") und auf der Insel Tinos ("Verde Tinos"). Alle genannten Vorkommen erhielten ihre metamorphe Prägung während der Kreidezeit.

Vorkommen in München: - Erdgeschoß-Verkleidung Sendlinger Str. 25

3.2.5. Kristalline Schiefer

In dieser Gruppe sind enthalten:

- Quarzitschiefer, Glimmerquarzit
Metamorph geschieferte Gesteine, überwiegend aus Quarz bestehend. Auf den Schieferungs- und damit Spaltflächen Glimmerbeläge aus Muskovit. Abbaue in Südtirol und in Norwegen.
- Chloritschiefer
Fast nur aus Chlorit, untergeordnet auch aus Serpentin aufgebauter kristalliner Schiefer; dunkelgrün bis blaugrün; meist gut spaltbar. Die Kleinfältelung der Minerale kann ein Schillern der Spaltflächen hervorrufen. Abbaue in den Südalpen Italiens.
- Knotenschiefer, Garbenschiefer
Kontaktmetamorphe Gesteine. In den durch Glimmerbesetzung seidig schimmernden Bruchflächen sind knoten- und leistenförmige Mineralneusproungen eingebettet.

3.2.6. Glimmerschiefer, Phyllite

Phyllite und Glimmerschiefer bilden sich metamorph aus tonigen Sedimentgesteinen. Sie enthalten hauptsächlich Quarz und Glimmerminerale, die auf den scharf ausgeprägten Schieferungsflächen einen intensiv seidigen Glanz hervorrufen.

Die im Steinhandel vertriebenen Glimmerschiefer kommen heute in der Mehrzahl aus verschiedenen Herkunftsgebieten Norwegens (MÜLLER, o.J.).

3.2.7. Basalt-Lava

Bei Mayen und Mendig in der Nähe von Maria Laach in der Eifel wird seit der Römerzeit Basalt-Lava als Naturwerkstein gebrochen. Diese "Rheinische Basalt-Lava" ist glasig ausgebildet, mit vielen feinen und groben Poren und Lucken. Im polierten Zustand ist ihre Farbe violett-schwarz; nicht poliert erscheint sie schlackenartig grau bis schwarz.

Vorkommen in München: - Fassadenteile des "Brauerhauses",
Oskar-von-Miller-Ring 1

3.2.8. Larvikit

Das Städtchen Larvik ist etwa 100 km südlich der norwegischen Hauptstadt am Ausgang des Oslofjordes gelegen. Dort wird an vielen Stellen ein im Perm entstandenes Syenitgestein gewonnen, das zu etwa 80 % aus blauen Anorthoklasen besteht, die zum Teil aufgrund ihres feinlamellaren Aufbaus Licht in schillernder Weise zu reflektieren vermögen. Die intensiv "leuchtenden" Sorten werden als "Larvikite" (LABRADOR, MARINA PEARL, BLUE PEARL) in alle Welt exportiert. Sie sind grobkristallin und von dunkelblauer, durch Pyroxen und Biotit ins schwärzliche gehender Farbe.

Vorkommen in München: - Sockelgestein Rosenstr. 6 ("Rosenapotheke")

3.2.9. Trachyt-Tuff

Der hier angesprochene, seit einigen Jahren in München eingeführte Trachyt-Tuff entstand im Alttertiär (Eozän) Oberitaliens in den Euganeischen Bergen ("Colli Euganei") südwestlich von Padua.

Das helle Gestein besteht aus einer intermediären Grundmasse mit K-Na-Feldspäten, eingestreuten Nadelchen von Amphibol und Schüppchen von Biotit. Neben völlig dichten Gesteinen kommen auch leicht poröse Partien zum Verbau. Einen besonderen Reiz bietet die leichte, rostbraune Eisenoxid-Färbung, die auch konzentriert in Form von Ausfällungsringen auftritt.

Vorkommen in München: - Erdgeschoßverkleidung und Bodenbelag
Theatinerstr. 49 ("Betten-Rid")

3.2.10. Suevit

In München wurden um die Jahrhundertwende erstmals einige Gebäudefassaden aus dem Suevit des Nördlinger Rieses ausgeführt. Infolge der Verwitterungsanfälligkeit mancher Chargen und wohl auch aufgrund beschränkter Lagerstättenvorräte hielt sich seine Verwendung hier jedoch in Grenzen.

Das schlackig-poröse, teils aus glasiger Masse, teils aus vielen größeren Gesteinsfetzen zusammengesetzte Gestein ist im frischen Zustand von grüngrauer, bereichsweise beiger bis blaugrauer Farbe.

Vorkommen in München: - Obere Fassadenverkleidung Kaufingerstr. 29 + 30
("Kübler")

3.2.11. Porphyrit

Einige neuere Bodenbeläge in München bestehen aus einem dichten, felsig brechenden, dunkel-braunroten Porphyrgestein (Rhyolit) mit Einsprenglingen von hellem Feldspat und Quarz.

Die dem Münchner Raum am nächsten liegenden Vorkommen gehören überwiegend permischen Schichten an und befinden sich in Sachsen, in Rheinland-Pfalz und in Südtirol.

Vorkommen in München: - Bodenbelag des 'Asamhofes', Sendlinger Str. 64

3.3. Klastische Sedimentgesteine

Die als "klastische Sedimentgesteine" bezeichneten Materialien haben am Gesamtbild der Stadt nur zu 12 % Anteil. Rechnet man die Konglomerate, insbesondere die Brannenburger Nagelfluh und die italienische Ceppo-Nagelfluh ab, so verbleiben nur noch 105 Vorkommen, oder 2,5 % der verbauten Naturwerkstein-Vielfalt für die eigentlichen Sandsteine.

3.3.1. Bayerische Nagelfluh

Der Ausdruck "Bayerische Nagelfluh" steht hier als Überbegriff für die zahlreichen Konglomeratgesteine aus dem südbayerischen und österreichischen Raum, die als Bau- und Denkmalsteine den Weg nach München gefunden haben.

Schon früh wurden die konglomerierten Deckenschotter aus der Mindel-Eiszeit als Werksteine gebrochen. Sie setzen sich vor allem aus kalkalpinem Geröllmaterial zusammen und treten in den tief eingeschnittenen Talhängen der Isar (zwischen Grünwald und Wolfratshausen), im Gleißental (südlich von Deisenhofen) und im Mangfalltal bei Holzkirchen zutage.

Andere Nagelfluhgesteine kommen aus Österreich. Neben einigen Abbauen im Südosten von Wien lagen bekannte Abbaubetriebe lange Zeit mitten im Stadtgebiet von Salzburg; die heute über den Handel beziehbare "Salzburger Nagelfluh" wird bei Golling abgebaut.

Hauptvertreter der Bayerischen Nagelfluhen in München ist seit der Jahrhundertwende die pleistozäne Brannenburger Nagelfluh, ein aus sehr unterschiedlichen Komponenten zusammengesetztes Konglomerat. Kalkalpines Material, Quarze, Granite, Gneise, Amphibolite und Sandsteine verleihen dem Gestein ein lebhaftes, buntes Aussehen. Das Zwischenmittel ist sandig, die einzelnen Körner nicht sehr kompakt miteinander verbacken. Das Vorkommen ist beschränkt auf den knapp 1 km langen Höhenzug "Biber" bei Degerndorf am Inn, auf dessen Ostseite es in 3 großen Steinbruchbetrieben abgebaut und verarbeitet wird.

Vorkommen in München:

- Isartaler Nagelfluh:
Sockel der Frauenkirche (größenteils mit Kieselputz überdeckt)
- Brannenburger Nagelfluh:
Große Fußgängerunterführung am Karl-Schönhaufen-Ring zwischen Prinz-Carl-Palais und Haus der Kunst

3.3.2. Italienische Ceppo-Nagelfluh

Eine im letzten Jahrzehnt uberaus häufig verbaute, grobstückige Breccie stammt vom Lago d'Iseo am südlichen Alpenrand zwischen Bergamo und Brescia. Es handelt sich um ein betongraues, aus einheitlichen Kalksteintrümmern und feinkörniger, calcitischer Grundmasse zusammengesetztes Gestein aus dem Pleistozän.

Vorkommen in München:

- Erdgeschoßverkleidung Kaufhaus "Beck" am Marienplatz

3.3.3. Sonstige Sandsteine

Die 60 in der Stadt gezählten Sandsteinvorkommen, die nicht aus Grünsandstein oder Buntsandstein bestehen, beinhalten eine sehr breite Palette von unterschiedlichen Sorten unterschiedlicher Herkunftsgebiete. Im folgenden seien lediglich einige durch REIS (1935) identifizierte Arten aus dem bayerischen Raum vorgestellt:

- Molassesandstein (Bausteinschichten - Oligozän) Faltenmolasse
hellbeige bis hellgrau, mittelkörnig mit gröberen Lagen
Löwenfiguren auf dem Maxtor am westlichen Ende der Prannerstraße
- Dogger-Sandstein (Eisensandstein - Dogger-Beta) Oberfranken
fein- bis mittelkörnig, braun
Arkadenpfeiler Maximilianstr. 6-8
- Rhätssandstein (Oberer Keuper) Oberfranken
gelblich bis hellgrau, fein- bis grobkörnig
Fassadenverkleidung Deutsche Bank, Lenbachplatz 2

- Burgsandstein (Mittlerer Keuper) Mittelfranken
rötlich bis grau, grobkörnig, feldspatführend
Neues Rathaus, Fassadenteile am Ostflügel, Marienplatz 8
- Coburger Sandstein = Weißer Mainsandstein
(Mittlerer Keuper) Oberfranken
weißlichgrau, fein- bis mittelkörnig, tonhaltig
Fassadenteile des Armeemuseums, Hofgarten
- Schilfsandstein (Mittlerer Keuper) Unter- und Mittelfranken
gelbgrau, tonhaltig, glimmerführend
Neues Rathaus - Treppenhaus, Marienplatz 8

3.3.4. Grünsandstein

Wichtig für die Münchner Bauten ist besonders der im Raum zwischen Regensburg und Kelheim verbreitete Regensburger Grünsandstein, der nach den wichtigsten Abbauorten auch als "Abbacher Grünsandstein" und als "Ihrlerstein" bezeichnet wird.

Der im Cenoman entstandene Werksandstein liegt in Mächtigkeiten bis etwa 8 m vor. Fein- bis mittelkörniger Quarzsand macht in der Regel die Hauptmasse des Materials aus. Eingestreut finden sich reichlich Glaukonitkörner, denen das Gestein seine graugrüne bis gelblich grüne Farbe verdankt. Dazu treten in unterschiedlicher Menge kalkiger Schalen-Feindetritus und auch größere, weißliche Schalenbruchstücke von Muscheln. Die einzelnen Komponenten sind vorwiegend durch Calcitausfällungen miteinander verbunden, untergeordnet kommen dolomitische und tonige Bindemittelanteile vor.

An einigen Gebäuden aus den 50er und 60er Jahren findet sich ein glaukonithaltiger Kreidesandstein des Turons aus Westfalen, der "Anröchter Sandstein" bzw. "Soester Grünsandstein". Er besitzt eine dunklere grüne Farbe als der Regensburger Stein und erscheint dichter und kompakter als dieser.

Vorkommen in München:

- Regensburger Grünsandstein:
Fassaden der Alten und der Neuen Pinakothek
Fassade des Königsbaus der Residenz am Max-Joseph-Platz
- Anröchter Sandstein
Erdgeschoßverkleidung und Arkadenpfeiler,
Weinstr. 3

3.3.5. Buntsandstein

Die Münchner Vorkommen von Buntsandstein entstammen vornehmlich dem Gebiet des Mainvierecks zwischen Wertheim und Aschaffenburg. Dem Unteren Buntsandstein gehören an der Miltenberger und der Heigenbrücker Sandstein, beide in massigen Blöcken zu gewinnen und interessant durch Ausbleichungen in Form von weißlichen Streifen und Flecken und durch punktförmige Anreicherungen von rostbraunem Limonit. Der Obere Buntsandstein liefert als Werksandstein den Plattensandstein, ein plattig absonderndes, glimmerführendes, feinkörniges und gleichmäßig dichtes Material von einheitlich roter Farbe.

Nach REIS (1935) finden sich an einigen Bauwerken Münchens auch Buntsandsteine aus dem Frankenalb (Kronach) und aus verschiedenen Vorkommen des Pfälzer Waldes verbaut.

Vorkommen in München: - Plattensandstein:
Gartenmauer Thierschstr. 46 (Maximilianstraße)

3.3.6. Tonschiefer

Tonschiefer stehen als diagenetisch überprägte klastische Sedimentgesteine an der Grenze zu den metamorphen Gesteinen.

Sie wurden früher auch in München an nicht wenigen Gebäuden zur Dachdeckung verwendet. Heute finden sich auch einige Wand- und Sockelverkleidungen kleinaus Tonschiefer in der Stadt.

Die Hauptvorkommen in Deutschland liegen in devonischen Schichten des Rheinischen Schiefergebirges, des Thüringer Waldes, des Frankenwaldes und des Harzes. Daneben spielen ausländische Dachschiefer, z.B. aus Portugal, eine an Bedeutung zunehmende Rolle auf dem deutschen Markt.

4. EXPOSITIONSDAUER

4.1. Ermittlung der Daten zur Expositionsdauer

Im Rahmen des Forschungsauftrages sollte unter anderem die Abhängigkeit der Verwitterung (des Verwitterungsfortschrittes) von der Zeit (der Expositions-
dauer der Werkstücke) herausgearbeitet werden (vgl. auch GRIMM & VÖLKL 1983).
Würde man die zu einem bestimmten Zeitpunkt festgestellten Verwitterungs-
erscheinungen einer hinreichend großen Zahl von Objekten mit den Verbaudaten
der Werkstücke in Zusammenhang bringen, so müßte sich - für die einzelnen
Gesteins- und Verwitterungsarten getrennt - der zeitliche Ablauf der Verwit-
terung nachvollziehen lassen (vgl. auch Abschnitte 6.3.2. und 6.4.3.).

Es zeigte sich allerdings, daß im städtischen Bereich der Verwitterungsab-
lauf an den einzelnen Werkstücken durch eine Reihe von Ereignissen unter-
schiedlicher Art gestört, überlagert oder ganz unterbrochen werden kann. So
besitzen die Bauten aus der Zeit vor dem 2. Weltkrieg nur mehr zu einem Vier-
tel ihres heutigen Bestandes die von späteren Eingriffen verschont geblieben-
en, ursprünglichen Werksteinausstattungen.

Die den Gesteinsbestand verändernden Ereignisse können vielfältiger Natur
sein:

Reinigung, Renovierung

- Entfernen des Schmutzbelages durch Abwaschen mit unterschiedlichen Mitteln
- Entfernen der schwarzen Gipskrusten und anderer verwitterter Par-
tien durch Sandstrahlen oder Nachbeschlagen (Stocken) der Oberfläche
- Restaurierungen mit Hilfe von mechanisch und chemisch wirkenden Mitteln
- Imprägnierungen zur Steinfestigung und Hydrophobierung
- Aufbringen frischer Anstriche (Ölfarbe, Dispersionsfarben, Lacke, Putz)
- Entfernen von Sprühlack-Aufschriften durch chemische Lösungsmittel

Austausch, Erneuerungen

- Ausbesserungen kleiner Schäden durch eingesetzte Steinteile
- Austausch einzelner beschädigter oder verwitterter Teile
- Austausch von ganzen Fassadenverkleidungen oder Denkmalbauten gegen
neues Material in der alten oder in geänderter Form

Kriegseinwirkungen

- Geschoßeinschläge, Beschädigungen durch herabstürzende Bauteile
- Brandfolgen
- Vernässungen durch beschädigte Dächer, Regenrinnen, Tropfleisten

Änderung der Verwitterungsbedingungen

- Umstellen von Denkmälern und Brunnen an andere Aufstellungsorte (z.T. mit Unterbrechung der Witterungseinwirkung durch zeitweilige Lagerung in Depots oder Restaurierungswerkstätten)
- Veränderungen am Bauwerk (Ein- und Umbauten an der Fassade; Einziehen wassersperrender Schichten)
- Veränderungen in der Umgebung des Bauwerks (Öffnen oder Schließen nahe gelegener Baulücken; Umwandlung einer verkehrsreichen Straße in eine Fußgängerzone etc.)
- Anbringen oder Entfernen von Verblendungen aller Art (Namensschilder, Leuchtreklamen, Zigarettenautomaten, Markisen etc.)

Die genannten Eingriffe in den Verwitterungsablauf lassen sich in der Regel nur dort gut erkennen und rekonstruieren, wo sie jüngeren Datums sind. Viele Veränderungen altern innerhalb weniger Jahre so weit, daß sie möglicherweise noch erkannt oder zumindest vermutet, aber kaum noch auf den Zeitpunkt der Einflußnahme hin fixiert werden können.

Schließlich existieren bereits zum Zeitpunkt des Beginns der Exposition unterschiedliche Ausgangsbedingungen für die danach ablaufenden Verwitterungsprozesse: Spezielle Lage am Baukörper; unterschiedliche Verbautechniken, Formen und Größen der Werkstücke; verschiedene Arten der Oberflächenbehandlung, Anstriche und Imprägnierungen; u.a.m.).

Es ist also zu unterscheiden zwischen den Baudaten der Gebäude und den Verbau-
daten der dort befindlichen Naturwerksteine. Bei Bauwerken mit original be-
lassener Natursteinausstattung sind beide Daten identisch. Liegt ein Unter-
schied zwischen beiden vor, ist meist die Expositionsdauer der Werksteine ge-
ringer als das Alter des Bauwerks (Umbauten, Renovierungen etc.). Es sind aber
auch Fälle denkbar, in denen ältere Werksteine in einen Neubau übernommen wer-
den, z.B. massive Sockelsteine, die nach einer Umarbeitung wieder Verwendung
gefunden haben.

Die Feststellung der Expositionsdaten für die im Untersuchungsgebiet befind-
lichen Gebäude und Objekte nahm viel Zeit in Anspruch. Zunächst wurde ver-
sucht, die bloßen Baudaten zu ermitteln, dann mußte durch Einschätzung des
aktuellen Bauwerkzustandes in jedem Einzelfall entschieden werden, ob die
Werksteine originalen Datums sind oder bei späteren Gelegenheiten hinzuge-
fügt oder verändert wurden.

Eine große Zahl von Datierungen, auch zum Wiederaufbau zerstörter Gebäude, konnte den folgenden Veröffentlichungen entnommen werden:

- ALCKENS, August Die Denkmäler und Denksteine der Stadt München
Callwey Verlag, 1936
- MEGELE, Max Baugeschichtlicher Atlas der Landeshauptstadt München
Neue Schriftenreihe des Stadtarchivs,
Band 3, 1951 und Band 10, 1960
- BILLER & RASP München, Kunst- und Kulturlexikon
Süddeutscher Verlag, 1972

Bei einer nicht unbeträchtlichen Zahl von Bauwerken, vor allem aus der Gründerzeit und den Nachkriegsjahren, ist das Baudatum bzw. das Datum des Wiederaufbaus am Bauwerk selbst als Inschrift überliefert.

Zur Feststellung der Baudaten von Unterführungen stellten das U-Bahn-Bauamt der Stadt München sowie das Städtische Bauamt, Brücken- und Tiefbau, freundlicherweise ihre Unterlagen zur Verfügung.

Weiterhin trugen zur Ermittlung der Datierungen bei:

- Denkmalliste des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege,
- "Bauten und Plätze in München - Architekturführer"
Callwey Verlag, 1972,
- Süddeutsche Zeitung, Veröffentlichungen im Lokalteil,
- verschiedene baugeschichtliche Literaturen, deren einzelne Auf-
führung in diesem Zusammenhang zu weit führen würde.

Einige wenige Datierungen wurden durch Gespräche mit Besitzern, Mietern oder Bewohnern der Anwesen in Erfahrung gebracht. Diese Möglichkeit wurde allerdings wegen des großen Zeitaufwandes nicht systematisch verfolgt.

Leider durften die Aufzeichnungen der Lokalbaukommission der Stadt München nicht eingesehen werden. Hier wären aus den Planungsunterlagen in wahrscheinlich idealer Weise die Bau- und Umbaumaßnahmen datierbar. Zur Einsichtnahme hätte aber in jedem Einzelfall die Erlaubnis des jeweiligen Hausbesitzers eingeholt werden müssen.

Durch die Ausschöpfung der genannten Datierungsmöglichkeiten konnten zwar sehr viele, aber dennoch nur ein Teil aller Gebäude und Objekte im Stadtgebiet erfaßt werden. Für den verbleibenden Rest mußten Einschätzungen des Verbaualters der Gesteine vorgenommen werden, bei denen eine Festlegung auf ein Jahrzehnt genau angestrebt wurde.

Die gewonnenen Daten sind in den Anlagen 3a und 3b ("Expositionsdauer") kartennäßig dargestellt. Ein Auszug aus der Liste der Datierungen findet sich in Tabelle 17 wiedergegeben.

Tab. 17: Auszug aus der Liste der Gebäudedatierungen

Kreuzviertel

K 2 Salvatorplatz 3 - Parkhaus

Ost- und Nordseite: Sockel Brannenburger Nagelfluh
Stufen Granit

1964 - 65 Neubau Bürogebäude und Parkgarage der Bayerischen Vereinsbank (A.F.)
(Architekt: F. HART)

K 3 Salvatorplatz 1 - Schule

Alle Seiten: Sockel Muschelkalk
Stufensteine Granit

1886 - 87 Schulneubau (F. LOEWEL) (M.M.)
? renoviert ?

K 3 Salvatorstraße 17 - "Salvatorkirche"

Alle Seiten: Sockelgesims und Pfeilerabdeckungen Travertin
Westseite: Schwelle Sandstein
Nordseite: Stufe Granit

1494 - 99 Friedhofkirche an der Stadtmauer (L. ROTTALER) (A.F.; K.L.)
1807 nach Säkularisierung als Salpeterdepot benutzt (M.M.)
1829 griechisch-orthodoxe Kirche (A.F.)
1934 Restaurierung (A.F.)
1944 Kriegsschäden (K.L.)
1948 Wiederherstellung und Restaurierung (A.F.)
? Teile der Gesimse vor wenigen Jahren gegen neue Stücke ersetzt

K 4 Briennerstraße 1 - "Moy-Palais"

Nord- und Ostseite: Sockel Muschelkalk
Innenhof: Sockel Muschelkalk
Sockelverkleidung der Durchgänge Treuchtlinger Kalk
Brunnen Muschelkalk
Bodenbelag (innen): Wiborgit (Rapakivi-Granit)

1819 1. klassizistischer Bau der Ludwigstraße (L.v.KLENZE) (A.F.)
im 2. Weltkrieg schwer beschädigt (K.L.)
1950 - 52 rekonstruierter Neubau (K.L.; G.I.)

K 4 Theatinerstraße 22 - "Theatinerkirche St. Kajetan"

Sockel und Gesimse: Kalktuff
Schwellen: Granit

1663 - 75 Kirche für die Theatinermönche (A. BARELLI; E. ZUCCALLI) (A.F.)
1765 - 68 Fassadengestaltung (CUVILLIES d.Ä.; R.A. BOOS) (A.F.)
im 2. Weltkrieg schwer beschädigt (K.L.)
1946 - 55 Restaurierung (K.L.)

K 4 Theatinerstraße 20/21 - "Theatinerhof"; Erweiterungsbau des Kultusministeriums

Sockel, Stufen, Türgewände, Bodenbelag: Brannenburger Nagelfluh
Brunnen: Marmor

1663 Kloster des Theatinerordens (A.F.)
1801 Säkularisierung (A.F.)
1944 Klosteranlage bis auf Westtrakt am Salvatorplatz zerstört (K.L.)
1970 - 72 veränderter Wiederaufbau (Architekt: G. GSAENGER) (K.L.)

A.F. Bauten und Plätze in München. Ein Architekturführer.- Callwey-Verlag 1972
K.L. München-Kunst- und Kulturlexikon; BILLER & RASP; Süddeutscher Verlag 1972
M.M. M. MEGELE; Baugeschichtlicher Atlas der Landeshauptstadt München;
Neue Schriftenreihe des Stadtarchivs München, Band 3, 1951

4.2. Stadtbaugeschichte Münchens

Die folgenden Ausführungen beruhen in wesentlichen Teilen auf BILLER & RASP (1972), BOSL (1974) und BRAUNFELS (1976).

Die Geschichte der Stadt beginnt 1158. Unter dem Welfen HEINRICH dem Löwen entstand eine planmäßig angelegte Stadtanlage und 1175 eine erste Befestigung mit Graben, Mauer und 5 Stadttoren. Durch den Verlauf der von Reichenhall nach Augsburg führenden Salzstraße war die Richtung der Hauptverkehrsader festgelegt. In einer Ausweitung derselben entstand der Marktplatz, der in der Folgezeit zusammen mit der Peterskirche, dem Alten Hof und der 1271 geweihten, romanischen Marienkirche den Schwerpunkt der Siedlung bildete (vgl. Abb. 3). Der Stadtgrundriß von 1175 ist bis heute erhalten geblieben; der umlaufende Stadtgrabenbach war bis 1896 existent.

1240 gelangte die Stadt in den Besitz der Wittelsbacher. Mit der Teilung des Herzogtums Bayern in Ober- und Niederbayern wurde München 1255 zu einer der 5 oberbayerischen Residenzstädte. 1505 wird es zur alleinigen Hauptstadt Bayerns.

Ab 1271 erfolgte, maßgeblich unter LUDWIG dem Bayern (1294 - 1347), eine Erweiterung der Stadt auf das 6-fache ihrer bisherigen Fläche, die 1337 mit der Anlage eines zweiten Mauerrings und 4 Haupt- sowie 5 Nebentoren abgeschlossen wurde. Im 15. Jh. kam eine äußere Mauer mit Zwinger, im 17. Jh., im Verlauf des 30jährigen Krieges, eine weitläufige Befestigungsanlage hinzu.

Abb. 3: Stadtentwicklung Münchens vom 14. bis zum 19. Jahrhundert
(umgezeichnet nach BILLER & RASP 1972)



Von diesen Bauwerken sind nur wenige Reste erhalten. Die bedeutendsten sind das Neuhauser, das Sendlinger und das Isartor. Die entstandene Siedlungsfläche wurde durch etwa west-ost- und nord-süd-verlaufende Straßenzüge in 4 Viertel geteilt, welche im 15. Jh. die Bezeichnungen 'Kreuzviertel', 'Graggenauer Viertel', 'Angerviertel' und 'Hackenviertel' erhielten. In dieser äußeren Form hatte die Stadtanlage bis ins 19. Jh. hinein Bestand (vgl. Abb. 3). Heute zeichnet der "Altstadtring" fast genau den Verlauf der Stadtbefestigung nach.

Eine lange Zeit latent bestehende Konfliktsituation zwischen Bürgerschaft und Fürstenhaus wirkte sich auch in baulicher Hinsicht auf das Innere der Stadt aus. Bereits die erste Residenz der Wittelsbacher, der Alte Hof, war - herausgerückt aus dem Zentrum der Stadt - in der äußersten Nordostecke der alten Befestigung angelegt. Aufstände der Bürger und Zünfte veranlaßten 1385 die Anlage einer wehrhaften Zwingburg, der "Neuveste", wiederum im Nordosten der nun neuen Befestigung und zunächst sogar außerhalb des eigentlichen Stadtgrundrisses. Aus der Neuveste ging im Verlauf der folgenden 5 Jahrhunderte die weitläufige Anlage der "Residenz" hervor. Als Ausdruck der bürgerlichen Macht entstanden dagegen im Zentrum der Stadt 1470-80 das Rathaus ("Altes Rathaus"), 1468-88 der gotische Neubau der Frauenkirche. Den baulichen Zustand der gotischen Stadt zeigt in anschaulicher Weise das im Bayerischen Nationalmuseum ausgestellte SANDTNER'sche Stadtmodell von 1572.

Aus gotischer Zeit stammen die frühesten, heute noch erhaltenen Naturwerksteinvorkommen an Außenfassaden der Innenstadt: An der Frauenkirche der Nagelfluh-Sockel (weitgehend verputzt), ein Sandsteinportal sowie zahlreiche Epitaphien vornehmlich aus rotem Knollenkalk; am "Weinstadt", Burgstr. 5, dem ehemaligen Stadtschreiberhaus, die wahrscheinlich von 1552 stammenden Portalteile aus Kalktuff.

Im 16. Jh., mit dem Einfluß der Renaissance und des Frühabsolutismus, begann die Fürstenstadt die bis dahin aufgeblühte Bürgerstadt schrittweise zurückzudrängen. Kennzeichnend dafür sind 3 Großbauunternehmungen:

- ab 1559 die Einrichtung eines neuen Jesuitenkollegs mit dem Bau der St. Michaelskirche (1583-97) in der Neuhauser Straße, wofür 36 Bürgerhäuser niedrigerissen wurden,
- der 1580 beginnende Ausbau der Residenz,
- ab 1590 die Anlage der Herzog-Max-Burg im Westen der Stadt, deren Bau 56 Bürgerhäuser forderte (einziger Rest der im 2. Weltkrieg völlig zerstörten Anlage: Der restaurierte "Maxturm", Lenbachplatz 7).

Die Folgen des 30jährigen Krieges sowie eine Pestepidemie der über ein Drittel der Bevölkerung zum Opfer fiel, beendeten die ersten Blütezeiten Münchens. Erst im 19. Jh. hatte sich die Stadt ökonomisch wieder erholt. Als einziger größerer, fürstlicher Baukomplex in der Innenstadt entstand 1662-75 das Theatinerkloster mit Kirche, deren Fassade erst 1768 vollendet wurde.

Aus der Zeit der Renaissance, des Barock und Rokoko sind als Fassaden- und Denkmalsteine aus Naturstein erhalten:

- Der Nagelfluhsockel des Glockenturmes von St. Michael (um 1597),
- die Brunnenschale des Wittelsbacher Brunnens aus Regensburger Grünsandstein im Brunnenhof der Residenz (um 1600),
- möglicherweise die Portalteile von Asamhaus (1730) und Asamkirche (1746) in der Sendlinger Straße,
- das Portal aus Tegernseer Knollenkalk des fürstlichen Palais Preysing, Residenzstr. 27 (1728),

- der Kalktuffsockel des Palais Holnstein (1737); heute: "Erzbischöfliches Palais", Kardinal-Faulhaber-Str. 7,
- Portal und Sockel aus Granit am Palais Preysing (1740), Prannerstr. 2,
- eine Brunnenschale aus Knollenkalk im Alten Hof (1785).

Die Natursteinteile

- der Michaelskirche (1597): Fassadenteile und 3 Portale aus Knollenkalk,
- der Westfront der Residenz (1616): Bildwerk und 2 Portale aus Knollenkalk; Sockel aus Kalktuff,
- der Mariensäule aus Knollenkalk am Marienplatz (1639),
- des Bürgersaals (1710): Portal aus Knollenkalk, Sockel aus Kalktuff,
- der Theatinerkirche (1768): Sockel und Fassadenteile aus Kalktuff,
- von 3 weiteren, kleineren Kirchenbauten

wurden aller Wahrscheinlichkeit nach in späteren Zeiten durch jeweils neue Teile ersetzt.

1791 wurden im Gefolge der französischen Revolution die Befestigungsanlagen der Stadt durch Kurfürst KARL THEODOR aufgelassen.

1808 - 12 leitete K. v. FISCHER im Auftrag König MAX I. mit der Ausarbeitung eines Generalplanes für die Anlage der sog. Maximilians-Vorstadt (Schwerpunkte: Briener Straße und Karolinenplatz) die Reihe der im 19. Jh. planvoll durchgeführten Stadterweiterungen ein (vgl. Abb. 3).

1816 - 50 entstand durch L. v. KLENZE und F. v. GÄRTNER auf Anregung Kronprinz LUDWIGs, des späteren LUDWIGs I., die vom Schwabinger Tor über den Odeonsplatz nach Norden führende Ludwigstraße.

1852 - 75 erfolgte unter MAX II. nach Plänen von F. BÜRKLEIN der Ausbau der Maximilianstraße mit der Maximiliansbrücke und dem weithin sichtbaren Abschluß durch das Maximilianeum auf dem östlichen Isarhochufer.

1890 schließlich wurde in der Zeit des Prinzregenten LUITPOLD unter dem Einfluß von A.v.HILDEBRAND und G.v.SEIDL die Anlage der Prinzregentenstraße mit Prinzregentenbrücke und Friedensengel-Anlage begonnen.

Es würde zu weit führen, alle noch heute bestehende Baulichkeiten dieser Stadterweiterungen aufzuzählen. Im folgenden seien einige, von der Natursteinausstattung her interessante Objekte aufgeführt:

Maxvorstadt

- 1830 Glyptothek - vorwiegend Untersberger und Eichstätter Kalk, Figuren aus Marmor
- 1836 Alte Pinakothek - Regensburger Grünsandstein
- 1839 Sockel des Denkmals für Kurfürst MAXIMILIAN I. am Wittelsbacher Platz - Rosenheimer Kalk
- 1848 Antikensammlung am Königsplatz - Untersberger und Eichstätter Kalk
- 1862 Propyläen am Königsplatz - Untersberger Kalk

Ludwigstraße

- 1833 Staatsbibliothek - Regensburger Grünsandstein, Donaukalk
- 1844 Ludwigkirche - Donaukalk
- 1844 Feldherrnhalle - Donaukalk
- 1852 Siegestor - Donaukalk
- 1862 Denkmal für König LUDWIG I. am Odeonsplatz - Untersberger Kalk

Maximilianstraße

- 1865 Völkerkundemuseum - Sandstein
- 1875 Denkmal für König MAX II. - Meißener Granit, Redwitzit
- 1906 neugestaltete Maximiliansbrücke - Muschelkalk

Prinzregentenstraße

- 1899 Bayerisches Nationalmuseum - Donaukalk, Kalktuff
- 1899 Friedensengel-Anlage - vorwiegend Donaukalk
- 1901 Luitpoldbrücke - Muschelkalk

Auch außerhalb dieser Großanlagen entstand in der Zeit bis zum 1. Weltkrieg eine Reihe öffentlicher bzw. durch das Königshaus veranlaßter Bauten:

- 1835 Königsbau der Residenz - Regensburger Grünsandstein
- 1837 Allerheiligen Hofkirche der Residenz - Regensburger Grünsandstein
- 1868 Technische Hochschule - Granit
- 1885 Akademie der Bildenden Künste - Trientiner Knollenkalk
- 1893 Neues Rathaus am Marienplatz, Osttrakt - Granit, Sandstein
- 1897 Justizpalast - Granit, Donaukalk
- 1905 Armeemuseum - Granit, Sandstein
- 1908 Neues Rathaus am Marienplatz, Westtrakt
- Granit, Donaukalk, Kalktuff, Muschelkalk

Dazu kam in der Zeit von 1880 bis 1914 eine Vielzahl von privat unternommenen Wohn- und Geschäftsbauten. Der 1871 siegreich beendete Krieg gegen Frankreich, die sich anschließende Reichsgründung, der beginnende Kolonialismus sowie die rasch Raum greifende Industrialisierung (vgl. auch 5.10.1.2.) hatten einen bis dahin beispiellosen wirtschaftlichen Aufschwung zur Folge, der sich durch die zahllosen Neu- und Umbauten der sog. "Gründerjahre" einschneidend auf das noch mittelalterlich geprägte Stadtbild auswirkte.

Eine wenige Bauten aus dieser Zeit:

- 1886 Kardinal-Faulhaber-Str. 14 (heute: "Bayerische Vereinsbank")
- Granit, Sandstein
- 1889 Lenbachplatz 3, Kaufhaus "Bernheimer" - Granit, Donaukalk
- 1897 Platzl 9, Hofbräuhaus - Granit, Muschelkalk
- 1898 Lenbachplatz 2, "Deutsche Bank" - Granit, Sandstein
- 1900 Lenbachplatz 8, Künstlerhaus - Muschelkalk, Donaukalk
- 1905 Neuhauser Str. 44, Kaufhaus "Oberpollinger" - Muschelkalk
- 1912 Dienerstr. 14+15, Kaufhaus "Dallmayr" - Muschelkalk
- 1914 Kaufingerstr. 22, Kaufhaus "Hirmer" - Muschelkalk

Mit dem 1. Weltkrieg und seinen Folgen kehrte sich der Wohlstand der Gründerzeit in wirtschaftliche Not und politische Unruhen um. 1918 mußte König LUDWIG III. vor der Revolution aus München fliehen. Mit der Unterzeichnung der Weimarer Verfassung 1919 fand die fast 700 Jahre währende Herrschaft der Wittelsbacher ihr formelles Ende.

Im 3. Reich war München als Schauplatz des Putschversuches von 1923 und als Gründungsort der NSDAP 1925 eine der erklärten Kultstätten des Nationalsozialismus. Von den geplanten städtebaulichen Umgestaltungen, die bis 1950 verwirklicht sein sollten, wurde jedoch nur ein geringer Teil ausgeführt.

Zum Beispiel:

- 1935 Königsplatz - Platzbelag mit Granitplatten,
umlaufende Mauer aus Muschelkalk
- 1935 Meiserstr. 10 und Arcisstr. 12 - Muschelkalk, Donaukalk
- 1937 Haus der Kunst, Prinzregentenstraße
- Brannenburger Nagelfluh, Donaukalk
- 1939 Ludwigstr. 2, Landwirtschaftsministerium - Frankendolomit

Der 2. Weltkrieg bedeutete für München mit der Zerstörung von nahezu der Hälfte der Stadt die größte Katastrophe seiner Geschichte. Etwa 70 Luftangriffe seit 1940, vor allem in den Jahren 1943 und 1944, legten ganze Stadtviertel durch die Wirkung der Spreng- und besonders der Brandbomben in Schutt und Asche. Im Bereich der Altstadt waren 60 % der Gebäude total zerstört (vgl. BAUER 1983).

Der Wiederaufbau der Stadt vollzog sich erstaunlich rasch während der 50er und 60er Jahre. Bereits am 9. August 1945 waren in der 2. Sitzung des Stadtrates nach dem Krieg die Grundlinien des später durchgeführten Neu- und Wiederaufbaus Münchens festgelegt worden. Nach dem sog. "Meitinger-Plan" sollte die städtebauliche Identität der Altstadt gerettet, andererseits Raum für den Verkehr geschaffen werden (NERDINGER 1984). Durch Zurücksetzen von Baulinien und Nicht-Wiederaufbau einiger Blockbebauungen wurden Straßenverbreiterungen erzeugt; dem Fußgängerverkehr dienten zahlreiche Arkadengänge und Passagen. Den größten Einschnitt in die alte Bausubstanz brachte die Anlage des "Altstadtringes", der zu drei Vierteln den Verlauf der Festungsmauern der alten Stadt nachzeichnet, im Nordosten aber gewachsene Stadtviertel und städtebaulich wichtige Zusammenhänge durch seine 60-70 m breite Trasse durchschnitten und zerstört hat.

Die Klagen über unnötiges und willkürliches Eingreifen in die noch bestehende alte Bausubstanz zugunsten verkehrstechnisch günstiger und wirtschaftlich profitabler Projekte fanden u.a. ihren Ausdruck im Begriff von der "2. Zerstörung Münchens" (SCHLEICH 1978).

4.3. Verbaualter der Naturwerkstein-Vorkommen

4.3.1. Gebäude

In Abbildung 4 sind 758 Gebäude nach den mutmaßlichen Verbaudaten der an ihren Außenfassaden befindlichen Naturwerksteine aufgezeichnet. Nicht berücksichtigt sind Gebäude, an denen Natursteine lediglich in Passagen und Innenhöfen oder nur in Form von Sockelleisten, Stufen oder Bodenbelägen vorhanden sind. Abbildung 5 gibt einen Überblick über die Verwendung verschiedener Gesteinsarten im Verlauf der Geschichte.

Die zeitliche Einstufung erfolgte nach den mit unterschiedlicher Genauigkeit feststellbaren Verbaudaten (vgl. 4.1.) der wesentlichen Natursteinteile der Fassaden. Bei einer Anzahl von Gebäuden mußten die Verbaudaten geschätzt werden. Bei Bauten aus der Gründerzeit konnte häufig nur eine pauschale Einstufung in die Zeitspanne 1880-1920 getroffen werden; die Gesamtzahl dieser Schätzungen wurde anteilmäßig auf die Menge der genauen Datierungen dieser 4 Dezennien verrechnet. Ebenfalls nur geschätzt wurde die Mehrzahl der Verbaudaten aus der Nachkriegszeit. Einige wenige Vorkommen, die nur sehr unsicher anzusprechen waren, wurden bei der Darstellung außer Acht gelassen.

Anzahl natursteintragender Gebäude im kartierten Gebiet

(Altstadt Münchens mit Straßenzügen des 19. Jh.)

aufgeschlüsselt nach Verbaudaten

(nur straßenseitige Fassadenverkleidungen berücksichtigt;
keine Innenhöfe, Bodenbeläge, Stufen, Denkmäler, u.ä.)

Stand: 1984

Gesamtzahl der erfaßten Gebäude: 758

Daten vor dem Ende des 2. Weltkriegs:

-  Baudaten geschätzt
-  Gebäudezahl mit wahrscheinlich
original belassenem Werksteinbestand

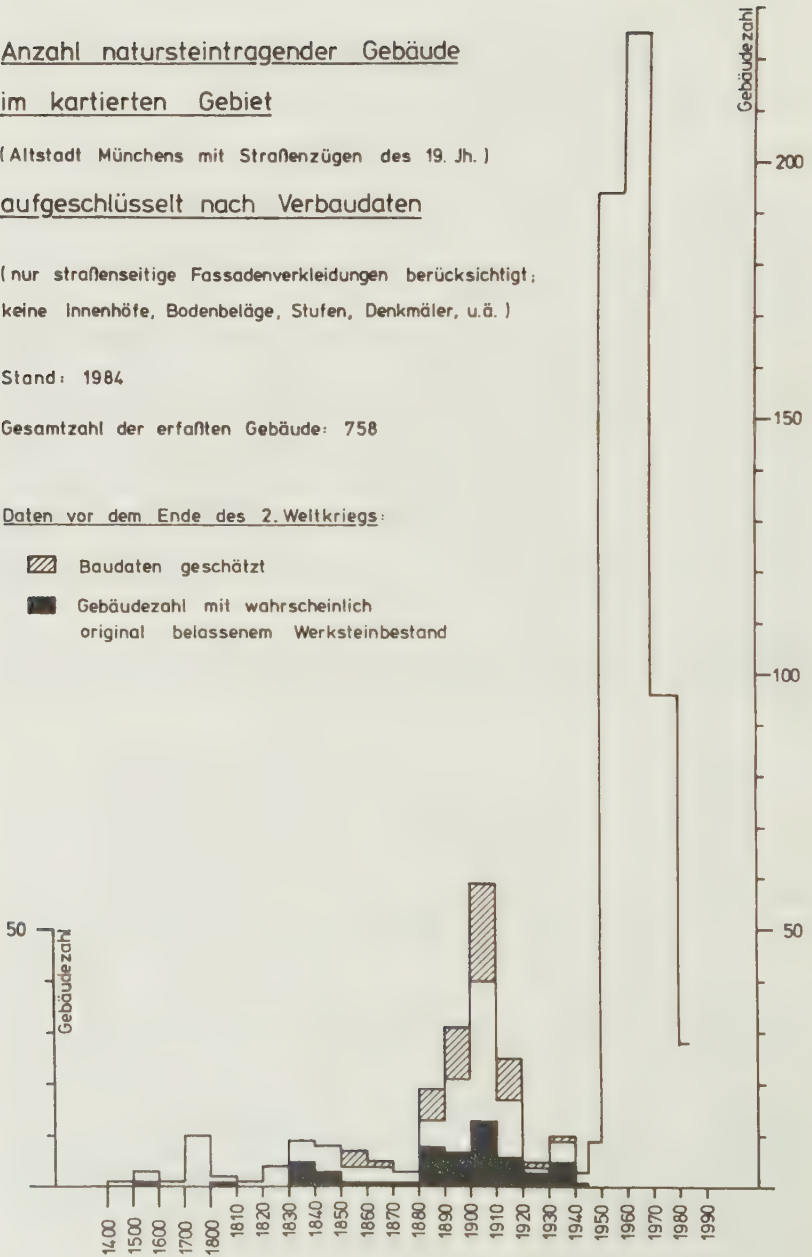


Abb. 4: Verbaudaten natursteintragender Gebäude

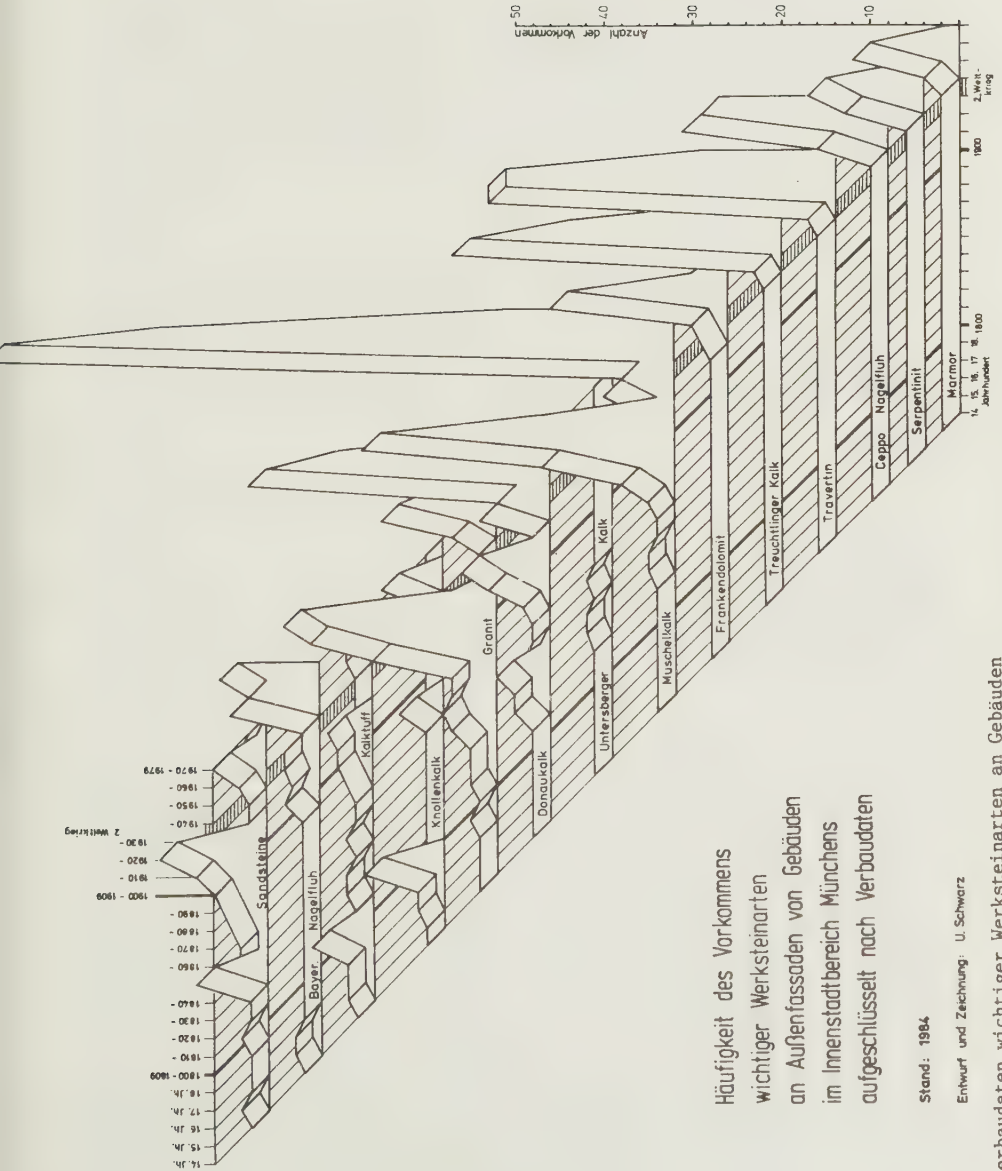


Abb. 5: Verbauten wichtiger Werksteinarten an Gebäuden

Dort, wo Teile der Steinverkleidung in jüngerer Zeit zu einem älteren Bestand hinzugekommen sind (z.B. bei vielen Geschäftshäusern die Verkleidung der Schaufensterfront im Erdgeschoß), wurde nur der ältere Bestand gewertet. Kompromisse mußten eingegangen werden in Fällen wie der Michaelskirche, deren Baudatum von 1597 dem Verbaudatum der Knollenkalk-Fassadenteile gleichgesetzt wurde, obwohl die heute dort befindlichen Teile zweifellos jüngeren Datums, wahrscheinlich aus der Nachkriegszeit stammend, sind. Dies geschieht mit Rücksicht auf die folgende Betrachtung zur historischen Verwendung bestimmter Gesteinsarten. Weitere Beispiele für einen solchen "identischen Ersatz" sind der Bürgersaal (Neuhauser Str. 48), die Westfront der Residenz und die Dreifaltigkeitskirche in der Pacellistraße.

Die in den Graphiken Abbildung 4 und Abbildung 5 aufgeführten Gebäude- und Vorkommenszahlen beziehen sich auf den Gebäudebestand, wie er 1984 in der Altstadt und den im 19. Jh. angelegten Straßenzügen zu beobachten war. Es sind darunter also nicht die Zahlen der in den jeweiligen Zeiträumen überhaupt errichteten und mit Naturstein versehenen Gebäude zu verstehen, sondern der heute von der ursprünglichen Menge noch übriggebliebene Rest. Die Betrachtung der dargestellten Verbaualter gestattet es gleichwohl, Aussagen zu machen zum Gebrauch von Naturstein in der Geschichte und zur Bautätigkeit insgesamt.

Abgesehen von einigen, zeitlich nicht einzuordnenden, alten Kalktuffquadern an der südlichen Zufahrt zum Alten Hof, dürften die ältesten, an einer Fassade verbauten Gesteine, ein Sandsteinportal der Frauenkirche (1488) sowie deren Nagelfluh-Sockel sein. Letzterer ist aufgrund der fortgeschrittenen Abwitterung mit einem ähnlich aussehenden Kieselputz überdeckt, der nur an einigen schadhafte Stellen das Naturgestein noch sehen läßt. Aus dem 16. Jh. stammt das vermutlich älteste noch original belassene Naturstein-Fassadenstück in München, der schwarz überkrustete, hohe Nagelfluh-Sockel des alten Glockenturms von St. Michael (Ecke Maxburg-, Ettstraße).

Natursteine wurden in München als Gebäudesteine bis zum 19. Jahrhundert nur sparsam verwendet. Das hängt u.a. mit der natürlichen Armut an Festgesteinen in der näheren Umgebung der Stadt zusammen. Günstig zu beschaffen waren lediglich die Nagelfluh des konglomerierten Mindel-Deckenschotter aus dem Isartal und Kalktuffe aus verschiedenen Orten Oberbayerns.

Über lange Zeiten hinweg war der gängige Baustein in München der Backstein. Als Rohstoff zu seiner Herstellung diente der Lößlehm auf der rißzeitlichen Hochterrasse östlich der Isar, der in zahlreichen Lehmgruben zwischen Ramersdorf im Süden und Ismaning im Norden abgebaut wurde. In der Gotik blieben die Backsteinmauern unverputzt, wovon heute noch die Frauenkirche und auch der Rest der alten Stadtmauer in der Jungfernturmstraße Zeugnis geben.

Ab der Renaissance und besonders im Barock und Rokoko hatte es sich eingebürgert, die rohen Ziegelmauern mit Kalkputz zu versehen. Der "Weißkalk" stammte zum überwiegenden Teil aus Tölz, wo er durch Brennen aus carbonatischen Isargeröllen gewonnen und mittels Flößen nach München geliefert wurde.

Von 1820 bis 1870, in den Regierungszeiten von LUDWIG I. (1825-48) und MAX II. (1848-64), machen sich in Abb. 4 die Anlagen der Maxvorstadt, der Ludwig- und der Maximilianstraße durch ein gehäuftes Auftreten naturstein-

tragender Gebäude bemerkbar. LUDWIG I. maß dem Naturstein eine wichtige Rolle bei der Wirkung seiner Bauten zu. Erstmals wurden in größeren Mengen Gesteine auch aus entfernteren Gegenden nach München geschafft (vgl. auch Abb. 5): Untersberger Kalk aus Salzburg für die Bauten am Königsplatz, Grünsandstein (Alte Pinakothek, Residenz) und Donaukalk (Feldherrnhalle, Ludwigkirche) aus der Gegend um Regensburg, Granite aus dem Bayerischen Wald und dem Fichtelgebirge (als Sockelgesteine) und fränkischer Muschelkalk (für Zierteile an den Universitätsbauten und der Pinakothek).

Etwa gleichzeitig erfolgte eine Wiederentdeckung der rohen Ziegelfassade (Alte Pinakothek), die unter MAX II. in den prächtigen Fassaden aus Terrakotten (Regierung von Oberbayern; Maximilianeum) noch verfeinert wurde.

Aus der Zeit von 1880 bis 1920 konnten 124 Gebäude beschrieben werden, an deren Fassaden Natursteine verbaut sind. Es sind dies im wesentlichen Wohn- und Geschäftshäuser - u.a. auch Schulgebäude, Gesandtschaften und ab 1906 die ersten Lichtspielhäuser - aus der "Gründerzeit". Natursteine wurden bei diesen Bauten gerne zur Fassadengliederung benutzt als Sockelgesteine, Gesimse, Erker, Fenster- und Türumrahmungen.

Mit Beginn des 1. Weltkrieges brach die Bauwelle ab. Wirtschaftskrise und politische Unruhen ließen bis in die 30er Jahre hinein in der Innenstadt Münchens nur wenige Bauten mit Natursteinteilen entstehen. Aus der Zeit des Nationalsozialismus sind 10 Gebäude mit repräsentativ gedachter Verwendung vor allem von Donaukalk erhalten.

Die weitaus größte Zahl der heute bestehenden Werksteinfassaden entstammt den Aufbauzeiten nach dem 2. Weltkrieg. Das "Wirtschaftswunder" in den 50er und 60er Jahren sowie die allmähliche Umbildung der Innenstadt zur "City", eines fast reinen Geschäfts- und Bankenbereichs, ließen die Natursteinfassade zur beliebtesten Gestaltungsform werden. Bis heute ist dieser "Trend zum Naturstein" nicht gebrochen. Die stark zurückgehenden Gebäudezahlen in Abb. 4 für die 70er und 80er Jahre erklären sich durch die inzwischen weitgehend abgeschlossene Wiederbebauung der noch offen gewesenen Baulücken.

4.3.2. Denkmäler, Brunnen, Plastiken

Mit den Begriffen: Denkmäler, Brunnen und Plastiken sind Einzelobjekte aus Naturstein gemeint, die im Außenbereich aufgestellt sind und einen gewissen künstlerischen bzw. repräsentativen Anspruch besitzen. In den in Abb. 6 dargestellten Zahlen sind also keine Aufgänge von Unterführungen, keine Pontons und Blumenkästen und auch keine Schrifttafeln wie z.B. Epitaphien enthalten.

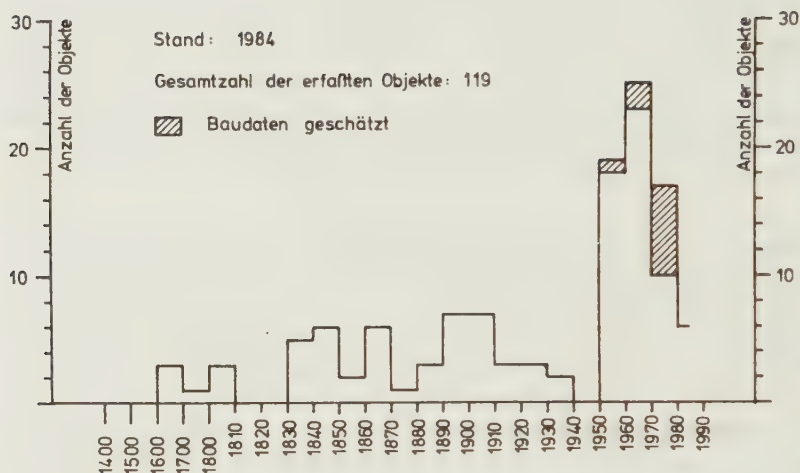


Abb. 6: Verbaudaten natursteintragender Denkmäler, Plastiken und Brunnen

Die Gestaltungen der einzelnen Steinbildwerke können sehr unterschiedlich sein. Die Mariensäule mit umgebender Balustrade wird ebenso als "Denkmal" gewertet wie der einfache Sockelquader des "Eberdenkmals" vor dem Deutschen Jagdmuseum (Neuhauser Straße) oder wie die komplexe Anlage des Kriegerdenkmals im Hofgarten. Unterschiedlich ist auch die Rolle, die der Naturstein bei den Bauwerken spielt: Oft sind nur die Sockel oder Sockelstufen eines Denkmals aus Naturstein ausgeführt, während die bedeutungstragenden Figuren häufig aus Bronze bestehen.

Wie keine andere Art der Naturstein-Anwendungen unterliegen gerade die Steinbildwerke zahlreichen Eingriffen und Veränderungen. Fast alle älteren Objekte wurden mindestens einmal, wahrscheinlich mehrfach gesäubert oder restauriert, wobei Ausbesserungen durch Steinersatzmassen, Einsetzen neuer Teilstücke und auch der vollständige Austausch gegen neue Gesteine zur Anwendung kamen. Einige Bauten wechselten im Lauf der Zeit ihren Aufstellungsort: Das Glückdenkmal wurde vom Odeons- zum Promenadeplatz versetzt, das Schillerdenkmal innerhalb des Maximiliansplatzes, der Nornenbrunnen vom Karlsplatz zur Ottostraße. Manche Anlagen waren zeitweise dem Verwitterungsangriff entzogen und befanden sich zur Lagerung und Restaurierung in Magazinen und Werkstätten.

Eine einigermaßen exakte Datierung der heute an den beschriebenen Denkmälern, Brunnen und Plastiken befindlichen Gesteinsteile, welche zur Kennzeichnung der Expositionsdauer wichtig wäre, stößt aus diesen Gründen auf große Schwierigkeiten. Bei den in Abb. 6 und auch in Tab. 18 aufgezählten Objekten wurde deshalb die Datierung in der Regel nach dem ersten Aufstellungsdatum vorgenommen. Eine solche Aufzählung ermöglicht zumindest Aussagen über die im Verlauf der Geschichte wechselnden Bauweisen und Gesteinsvorlieben.

Die Daten in Abb. 6 und Tab. 18 können wiederum natürlich nur die Anzahlen der bis heute erhalten gebliebenen Steinobjekte wiedergeben; errichtet wurde zu jeder Zeit eine höhere Anzahl. Gleichwohl dürfte die "Schwundrate" bei den Denkmälern niedriger anzusetzen sein als bei den Gebäuden.

Die in Abb. 6 dargestellten Häufigkeiten folgen, etwas weniger deutlich, aber erkennbar, dem historischen Ablauf, wie er für die Gebäudefassaden in Abschnitt 4.3.1. (vgl. Abb. 4) geschildert wurde.

Nur wenige Objekte sind aus der Zeit vor 1800 erhalten. Das wohl älteste, öffentlich präsentierte Werkstück in München wurde in der Darstellung allerdings nicht berücksichtigt. Es ist der aus "Rosengranit" von Assuan gefertigte, altägyptische Obelisk, der 1972 vor der Staatlichen Sammlung Ägyptischer Kunst (Nordtrakt der Residenz) auf einem Muschelkalk-Sockel aufgestellt wurde. Er entstand wahrscheinlich während der Römischen Kaiserzeit in Ägypten und gelangte über Frankreich schließlich nach München. Die Spitze des Obelisken wurde um 1800 in Paris durch ein neues Stück ersetzt.

Andere Stücke mit ähnlich hohem Alter befinden sich möglicherweise unter Bildhauerarbeiten, die in den Innenhöfen des Künstlerhauses und des Bernheimerhauses aufgestellt sind. Sie wurden dort aus verschiedenen Ländern und Epochen zusammengetragen und werden in dieser Arbeit nicht weiter beachtet.

Das älteste "Münchner" Stück dürfte die Schale des Wittelsbacher Brunnens im Brunnenhof der Residenz darstellen, angefertigt aus Regensburger Grünsandstein. Das Aufstellungsdatum sollte ungefähr gleichzusetzen sein mit der Entstehung der dazugehörigen Bronzefiguren, für die ein Zeitraum zwischen 1600 und 1620 angenommen wird (BRUNNER & HOJER 1979). Möglicherweise existieren innerhalb der Residenz, z.B. im Grottenhof, noch etwas ältere, in München geschaffene Werkstücke, die aber, da sie nicht frei zugänglich sind, bei diesen Betrachtungen ebenfalls außer Acht gelassen wurden.

Weitere frühe Arbeiten sind die Mariensäule (1639), ein Brunnen im Alten Hof (1785), 4 Löwenfiguren auf dem Maxtor und die dazugehörige Brunnenanlage (1805) sowie ein Denkmalsockel im Finanzgarten (1803). Alle diese Bauwerke sind restauriert, die Anlage der Mariensäule wurde 1972 vollständig in neuem Steinmaterial ausgeführt.

Ab 1830 wirkte sich die Bautätigkeit LUDWIG I. auch in einer steigenden Zahl von Denkmalbauten aus. In den folgenden Jahrzehnten und bis zum 2. Weltkrieg kamen in fast ununterbrochener Folge weitere Bildwerke, ganz oder in Teilen aus Naturstein bestehend, hinzu.

Der größte Teil der heute vorhandenen Bildhauerarbeiten aus Stein entstammt allerdings erst der Nachkriegszeit. Hier sind vor allem kleinere Brunnenanlagen, aber auch Denkmalsockel und reine Steinplastiken in figürlicher oder abstrakter Darstellungsweise zu nennen.

Tabelle 18 bringt eine Gesamtdarstellung der bei den heute existierenden Denkmälern verbauten Gesteinsarten, aufgegliedert nach den Aufstellungsdaten der jeweiligen Bauwerke. Da oft mehr als eine Gesteinsart an einem Bauwerk vorhanden ist, liegt die Zahl der Vorkommen der Gesteinsarten etwas höher als die Zahl der Bauten.

Tab. 18: Verbaudaten der Werkgesteinsarten an Denkmälern, Brunnen und Plastiken (zur Aufgliederung der Gesteinsarten vgl. Kap. 3)

	Zusammen	17. Jahrhundert	18. Jahrhundert	1800 - 1899										1900 - 1984									
				1800 - 1809	1810 - 1819	1820 - 1829	1830 - 1839	1840 - 1849	1850 - 1859	1860 - 1869	1870 - 1879	1880 - 1889	1890 - 1899	1900 - 1909	1910 - 1919	1920 - 1929	1930 - 1939	1940 - 1949	1950 - 1959	1960 - 1969	1970 - 1979	1980 - 1984	
Bautenzahl	119	3	1	3	-	5	6	2	6	1	3	7		7	3	3	2	-	19	25	17	6	
Donaukalk	20	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	2		1	1	-	1	-	4	7	3	-	
Muschelkalk	17	-	-	-	-	2	-	-	-	-	-	1		1	-	1	1	-	3	3	5	-	
Knollenkalk	16	2	1	-	-	-	-	-	-	-	-	1		-	-	1	-	-	5	6	-	-	
Kristalline Marmore	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	1		3	-	-	-	-	1	-	1	2	
Untersberger Kalk	6	-	-	-	-	1	-	-	2	-	1	-		-	2	-	-	-	-	-	-	-	
Kalktuff	4	1	-	2	-	-	-	-	-	-	-	-		-	1	-	-	-	-	-	-	-	
Travertin	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		-	-	1	-	-	2	1	-	-	
Enzenauer Kalk	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3		-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Rosenheimer Kalk	2	-	-	-	-	1	-	-	1	-	-	-		-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Treuchtlinger Kalk	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		-	-	-	-	-	1	-	-	-	
Frankendolomit	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		-	-	-	-	-	1	-	-	-	
Sonstige Carbonate	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1		-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Granite	34	-	-	1	-	-	1	6	2	3	1	2	2	2	-	1	-	-	2	1	7	3	
Gneise	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		-	-	-	-	-	1	-	-	-	
Serpentinit	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		-	-	-	-	-	-	-	-	1	
Basalt-Lava	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		-	-	-	-	-	1	-	-	-	
Bayer. Nagelfluh	15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		1	-	1	-	-	6	6	1	-	
Sonstige Sandsteine	6	-	-	4	-	-	-	-	-	-	-	-		-	-	-	-	-	1	1	-	-	
Grünsandstein	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Zahl der Bauteile	144	4	1	8	-	5	6	2	6	1	4	12		8	4	5	2	-	25	28	17	6	

5. URSACHEN DER WERKSTEINVERWITTERUNG (VERHÄLTNISSE IN MÜNCHEN)

Bevor die zur Werksteinverwitterung führenden Vorgänge und die sie auslösenden Faktoren behandelt werden können, muß auf den Begriff 'Verwitterung' genauer eingegangen werden. Die auf der engeren Wortbedeutung fußende, lexikalische Erklärung als "Angriff durch Witterungseinflüsse" muß für unsere Zwecke erweitert werden, da nicht allein klimatisch bedingte Faktoren an der Veränderung und Zerstörung der Werksteine beteiligt sind.

Eine nützliche, wenn auch etwas umfangreiche Definition ist in DIN 52 106: "Prüfung von Naturstein: Beurteilungsgrundlagen für die Verwitterungsbeständigkeit" gegeben: Unter 'Verwitterung' im Sinne der Norm werden verstanden: "Alle sichtbaren oder verborgenen chemischen und physikalischen Veränderungen qualitätsmindernder Art, die ein Gestein als Baustoff durch die Einflüsse der Atmosphären einschließlich der Verunreinigungen der Luft, der klimatisch bedingten Temperaturen und ihrer Schwankungen, der Oberflächen- und Bodenwässer und der pflanzlichen und tierischen Lebewelt innerhalb der in Frage kommenden Zeiträume erfährt".

Für die vorliegende Arbeit wurde von folgenden Definitionen ausgegangen:

"Verwitterung" sind alle Veränderungen, welche die Substanz und das Aussehen eines Werksteines im Laufe seiner Expositionszeit erfährt.

"Verwitterungserscheinungen" sind alle sichtbaren oder durch die verschiedenen Untersuchungsmethoden feststellbaren Veränderungen des Gesteinszustandes gegenüber seinem Neuzustand.

Das "Verwitterungsgeschehen" insgesamt fußt auf den "Verwitterungsfaktoren" und den durch sie beeinflussten "Verwitterungsvorgängen" (Abläufen, Prozessen), und es führt zu den am Werkstück feststellbaren "Verwitterungserscheinungen" (Schadensformen).

Die "Verwitterungsursachen" sind entweder in den meist komplex verlaufenden Verwitterungsvorgängen zu suchen oder in direkten Auswirkungen bestimmter Faktoren.

Häufig sind die Zusammenhänge verwickelt. Für ein Absanden im Kapillarsaumbereich ist eine direkte Ursache gegeben in der Druckwirkung dort aus- und umkristallisierender Salze; zugrunde liegen aber die Bereitstellung der Salze und der Salzlösung sowie die gesamten Vorgänge der kapillaren Feuchtigkeitsbewegung, des Salztransportes und der Salzanreicherung, die gesteuert werden durch das Niederschlagsangebot und die sich in stündlichem und täglichem Wechsel ändernden Faktoren: Lufttemperatur, Insolation, Luftfeuchtigkeit.

Die meisten Autoren, die sich mit dem Verwitterungsgeschehen in seiner Gesamtheit befassen, geben Aufstellungen der wesentlichen Verwitterungsfaktoren wieder: KIESLINGER (1932); STOIS in REIS (1935); QUERVAIN (1945, 1951); REICHEL (1975); WINKLER (1975); KNÖFEL (1980); WIHR (1980); ZEHNDER (1982); SNETHLAGE (1984); GRIMM (1984).

Eine Reihe von Arbeiten behandelt zusätzlich oder ausschließlich die methodischen Möglichkeiten zur Prüfung der Verwitterungsbeständigkeit: HIRSCH-WALD (1912); FITZNER (1970); FRANK (1981); NIESEL & SCHIMMELWITZ (1982) sowie DIN 52 100 - 52 108 und 52 111 - 52 113.

(Über die speziellen Zielrichtungen der genannten Arbeiten geben die aus dem Literaturverzeichnis zu ersiehenden Titel weitgehend Auskunft.)

Üblicherweise gliedern sich Aufstellungen von Verwitterungsfaktoren nach dem aus der Lehre der Geowissenschaften übernommenen Schema der Verwitterungsarten in: Physikalische, chemische und biologische Verwitterung. Mitunter finden sich die klimabedingten und die gesteinsbedingten Faktoren in eigenen Kapiteln (REICHEL 1975), bzw. Verwitterungsfaktoren und -vorgänge getrennt behandelt (GRIMM 1984).

Meist geht die Behandlung der Themen von einzelnen Vorgängen und Faktoren aus, die unmittelbar einen Verwitterungsschaden auslösen. Der sichtbar werdende Gesteinsschaden ist aber oft nur letztes Glied in einer ganzen Kette von sich beeinflussenden Ursachen und Wirkungen. Mit der nachfolgend vorgestellten Gliederung wird versucht, das Verwitterungsgeschehen zu den elementar vorhandenen Einflußfeldern hin aufzulösen, durch deren Zusammenspiel überhaupt erst die Voraussetzungen für die Entstehung spezieller Schadenssituationen geschaffen werden (vgl. Tabelle 19):

1. Umfeld (Klima; Baugrund)
2. Gestein
3. Temperatur und Strahlung
4. Luft und Luftbewegung
5. Wasser
6. Inhaltsstoffe in Luft und Wasser
7. Organismen
8. Schwerkraft
9. Zeit
10. Mittelbare und unmittelbare anthropogene Einflüsse.

Tab. 19: Verwitterungsfaktoren, Verwitterungsvorgänge, Verwitterungserscheinungen

Faktoren	Verwitterungsrelevante Vorgänge	Verwitterungserscheinungen
1. <u>Umfeld</u>		
1.1. Klima	Vgl. 3./4./5./10.1.1.	Vgl. 3./4./5./10.1.1.
1.2. Baugrund	Baugrundsetzung (vgl. auch 10.1.6.) Durchfeuchtung durch aufsteigende Grundfeuchte; Vgl. 5.3.	Risse; Brüche Vgl. 5.3.
2. <u>Gestein</u>		
Stoffbestand	(nur soweit vom Gesteinsmaterial ausgehend): Silikatminerale Wärmelehre Freisetzung von Kationen Carbonate Abgabe von Ca- und HCO ₃ -Ionen Aufnahme und Anlagerung von Sulfat-, Eisen- und Kupferlösungen Carbonatlösung; Vgl. 6.2./6.3. Tonminerale hydratisches Quellen und Schrumpfen Auswaschung Metallverbindungen Lösung und Ausfällung; Oxidation, Reduktion Mineralzusammensetzung hydrische und thermische Bewegungen mechanische Oberflächenbearbeitung Beschaffenheit des Porenraumes Wasseraufnahme; Vgl. 5. Beeinträchtigung der mech. Festigk. Gefügestörungen Beeinträchtigung der mech. Festigk. Gesteinsrestspannungen langsame Entspannung	Gefügelockerung Verfärbung Gipskrustenbildung; (Mikrokarst) Gipskrusten; Verfärbungen Gefügelockerung Gefügelockerung; raue Abwitterung; Auswintern Verfärbungen; Ausbleichungen Gefügelockerung Mikrorisse; Anlage von Schalenbildungen Vgl. 5. Abrieb; Risse; Brüche Abrieb; Risse; Brüche Gefügelockerung; Verbiegungen; Brüche
3. <u>Temperatur und Strahlung</u>		
3.1. Lufttemperatur	Steuerung der relativen Luftfeuchtigkeit = Befeuchtung und Austrocknung der Baustoffe; Vgl. 5.1. Aktivierung des Kapillarwasserdurchsatzes = Salzanreicherungen in Kapillarwasserräumen Förderung der Salzkristallisation und -umkristallisation Eisbildung bei Frosttemperaturen	Vgl. 5.1. Vgl. 5.2.3./5.2.6./5.3./6.3.2. Ausblühungen; Salzschäden (Gefügelockerung; Gesteinszerfall); Krustenbildungen Vgl. 5.4.

Faktoren	Verwitterungsrelevante Vorgänge	Verwitterungserscheinungen
3.2. Insolation	Thermische Dehnung von Mineralien und Gesteinen Thermische Dehnung von metallischen Bauteilen Intensivierung des Kapillarwasserdurchsatzes = Salzanreicherung in Kapillärwasserräumen Thermische Dehnung "Brennen" von Kalk	Gefügelockerung; Verbiegungen (Risse und Brüche bei behinderter Ausdehnung) Risse, Brüche in angeschlossen Steinbauteilen Vgl. 5.2.3./5.2.6./5.3./6.3.2. Absprengungen; Durchsprengungen Materialzerfall
3.3. Brandwirkung		
4. Luft und Luftbewegung	Transport von Schadstoffen und Feuchtigkeit (vgl. auch 5.1./6.) Beeinflussung der Schlagregennichtung Förderung der Verdunstung, bzw. der Trocknung der Baustoffe (hygrische Schrumpfung; Salzkristallisation) Winderosion (Abtrag von Ausblüungssalzen, lockeren Verschmutzungen und locker gewitterten Gesteinstellen) Staudruck Einpressen von Regennässe in Hohlräume und Spalten Mechanische Belastung von Plattenaufhängungen	Verschmutzung; Gipsverkrustungen; Raue Abwitterung (=Mikrokarst) Raue Abwitterung (=Mikrokarst) auf Luvseiten; Verschmutzung, Verkrustung auf Leeseiten Gefügelockerung; Ausblühungen (Salzschäden); Gipskrustenbildung Säuberung; raue Abwitterung (Mikrokarst); selektive Auswitterung weicher Partien Durchfeuchtung; tief reichende Wirkung von Lösungsprozessen und Salzkristallisationen Ausbrüche; Herabfallen von Bauteilen
5. Wasser allgemein:	Lösungsmittel Transportmittel für Salze (Anreicherung in Kapillärwasserräumen) Hygrisches Quellen und Schrumpfen Eisbildung bei Frost Dauernde Durchfeuchtung, Vernässung Austrocknung der Baustoffe Hygrische Schrumpfung Kristallisation und Dehydratation von Salzen	Mikrokarst (Abwitterung); Mobilisierung von Salzionen Ausblühungen; Salzschäden (Gefügelockerung, Gesteinszerfall); hygrokopische Durchfeuchtung Gefügelockerung Absprengungen; Durchsprengungen Schutzablagerungen; Organismenbewuchs; Krustenabscheidungen; randlich Ausblühungen mit Salzschäden Gefügelockerung Ausblühungen; Salzschäden (Gefügelockerungen, Gesteinszerfall); Gipskrustenbildungen
5.1. Luftfeuchtigkeit		

Faktoren	Verwitterungsrelevante Vorgänge	Verwitterungserscheinungen
5.1. Luftfeuchtigkeit	Befeuchtung der Baustoffe Hydratische Dehnung Hydratation von Salzen Lösungsaufnahme von Salzionen und Gasen, dabei Umwandlung von Carbonat zu Gips	Gefügelockerung Gefügelockerung; Gesteinszerfall Rauhe Abwitterung (Mikrokarst) Gefügelockerung; Mikrokarst; Gipskrusten
5.2. Regenwasser		
5.2.1. Schlagregen	Transport von Schadstoffen in gelöster Form Bereitstellen von Ablaufwasser, Stauwasser, Sickerwasser, Kapillarwasser, Tropfwasser, Spritzwasser	Vgl. 6. siehe jeweils dort
5.2.2. Ablaufwasser	Abspülen von Verschmutzungen, Ausblühungen und locker gewitterten Gesteinstteilen Schmutzablagerung unter vorstehenden Bauteilen	Säuberung; rauhe Abwitterung (Mikrokarst) Verschmutzung; Gipskrustenbildung; Salzschäden Vgl. 5.2.3./5.2.6.
5.2.3. Stauwasser	Transport von gelöster Substanz und lockeren Gesteinstteilen nach unten, wo sie über Stauwasserlagen in Kapillarsaumbereiche aufgenommen werden können	
5.2.4. Sickerwasser	Versorgung der Kapillarwassersäume mit Feuchtigkeit und Salzen An Fassaden und Denkmälern tiefreichende, periodische Durchfeuchtung Bei Brunnen oder mit Erde hinterfüllten Mauern ständige Durchfeuchtung; Verdunsten des Sickerwassers an Bauteilfugen	Vgl. 5.2.6. Vgl. 5.2.6./5.4. Vernässung; Mooswachstum; Kalkkrustenbildung
5.2.5. Winddruckwasser	Tiefreichende Durchfeuchtung der Fassadenbauteile	Vgl. 5.2.6.
5.2.6. Kapillarwasser	Periodische Durchfeuchtungen von Stauwasser- und Bodenwasserlagen ausgehend; Salzanreicherungen in Kapillarwassersäumen	Ausblühungen; Salzschäden (Gefügelockerung, Gesteinszerfall)
5.2.7. Tropfwasser	an Abtropfstellen: Auskristallisation von Salzen an Auftreffstellen: Kalkabscheidung; Erosion; Imprägnierung mit eisen- und kupferhaltigen Lösungen Mechanische Erosion	Ausblühungen; Salzschäden Kalkkrustenbildung; Verfärbungen
5.2.8. Spritzwasser	Mechanische Abspülung; Durchnässung Verdunsten des Spritzwassers von Brunnenanlagen	Abwaschung; Auswitterung Säuberung; Ausbleichung, Kalkkrustenbildung
5.3. Grundfeuchte	Ständige Durchnässung; periodische Austrocknung Salzanreicherungen in Kapillarwassersäumen Eisbildung bei Frost	Organismenbesatz Ausblühungen; Salzschäden (Gefügelockerung, Gesteinszerfall) Vgl. 5.4.

Faktoren	Verwitterungsrelevante Vorgänge	Verwitterungserscheinungen
5.4. Schnee und Eis	Ausdehnung des gefrierenden Wassers im Gesteinsporenraum Vernässung durch Schneeschmelzwasser Anreicherung von Tausalzen in Kapillärwassersäumen	Absprengungen; Durchsprengungen; Abtrag locker gewitterter Gesteinstteile Vgl. 5.2.4./5.2.6. Vgl. 5.2.6./6.3.2.
6. <u>Inhaltsstoffe in Wasser und Luft</u>		
6.1. Feststoffe	Auflagerung, Anlagerung Verkleben und Verdichten der Gesteinsoberfläche; Behinderung des Feuchtigkeitsaustausches Bereitstellen von Salzen Windkorrasion	Verschmutzung; Verkrustung; Verfärbungen Ausblühungen; Salzscheiden; Abplatzen von Schalenbildungen und Verkrustungen Vgl. 6.3.2. Abwitterung Vgl. 6.3.1.
6.2. Gase	Säurebildung in Wasser (vgl. 6.3.1.)	Raue Abwitterung (Mikrokarst)
6.3.1. Säuren	Carbonatblösung Bei Verdunsten des Wassers Salzabscheidung	Gipskrustenbildungen; Ausblühungen
6.3.2. Salze	Salzanreicherungen in Kapillärwassersäumen; Aus- und Umkristallisation von Salzen Imprägnierung mit eisen- und kupferhaltigen Lösungen	Ausblühungen; Salzscheiden (Gefügelockerung, Gesteinszerfall); Krustenbildungen Verfärbungen
7. <u>Organismen</u>		
7.1. Mikroorganismen	Besiedlung der Gesteinsoberflächen durch Algen, Bakterien, Flechten und Pilze Evtl. Produktion von Säuren = Minerallösung Evtl. Entstehung von Salzen	Organismenbesatz Gefügelockerung; Mikrokarst Vgl. 6.3.2.
7.2. Pflanzen	Turgordrucke; Wachstumsdrucke Feuchtespeicherung und Lebenstätigkeit der Moose Evtl. Produktion von Säuren Verrötung von abgefallenem Laub	Verstellungen von Gesteinsblöcken; (Risse) Kalkinterbildungen Mikrokarst Verfärbung
7.3. Tiere	Exkremente	Verschmutzung; Ausblühungen; (Salzscheiden)
8. <u>Schwerkraft</u>	Regenablaufwasser Im Abaufschatten Akkumulation von Staub und Salzen	Auf Ablaufbahnen Säuberung und raue Abwitterung (Mikrokarst) Verschmutzung; Verkrustungen; Salzscheiden

Faktoren	Verwitterungsrelevante Vorgänge	Verwitterungserscheinungen
8. Schwerkraft	Bildung von Stauwasser Bildung von Sickerwasser und Tropfwasser (vgl. 5.2.4./5.2.7.) Staubablagerungen auf horizontalen Bauteilflächen Versorgung der Stauwasserlagen und Kapillarwassersäule mit Salzen Biegezugbeanspruchung von Bauteilen und Bauteilaufhängungen	Vgl. 5.2.6. Vgl. 5.2.4./5.2.7. Verschmutzung; Verkrustung Vgl. 5.2.3./5.2.6./6.3.2. Ausbrüche; Durchbrüche; Herabfallen von Platten; Verbiegungen
9. Zeit	Zunahme der Expositionsdauer	Intensivierung und Mehrung von Schäden
10. Anthropogene Einflüsse	Höhere Lufttemperaturen (vgl. 3.1.) Niedrigere relative Luftfeuchtigkeit (vgl. 5.1.) Erhöhter Staubanteil (vgl. 6.1.)	Vgl. 3.1. Vgl. 5.1. Vgl. 6.1.
10.1.1. Stadtklima 10.1.2. Industrialisierung 10.1.3. Öff. Energievers. 10.1.4. Straßenverkehr 10.1.5. Stadtentwässerung	Emissionen von CO, CO₂, NO_x, SO₂ und Staub (vgl. 6.1./6.2./10.1.1.) Nicht kanalisiertes Abwasser: Bereitstellung von Salzen (vgl. 6.3.2.) in Kapillarwassersäulen (vgl. 5.2.6.) Vernässungen des Mauerwerks (vgl. 5.3.)	Vgl. 6.1./6.2./10.1.1. Vgl. 5.2.6./6.3.2. Vgl. 5.3.
10.1.6. Bautätigkeit	Freisetzung von Staub und Salzen (vgl. 6.1./6.3.2.) Bauwerkssetzungen	Vgl. 6.1./6.3.2. Risse; Brüche
10.1.7. Bautechnik	Nicht lagerhaftes Versetzen schichtig ausgebildeter Sedimentgesteine Verbau bruchfeuchter Gesteine kurz vor der Frostperiode Rosten von Eisenklammern und Eisendübeln Mechanische Beanspruchung gering dimensionierter Platten Bauwerkssetzungen; Bewegung von Bauteilen Thermische Dehnung von Metallfensterrahmen Kondenswasserbildung an Metallfensterrahmen	Aufspalten der Schichtlagen; Ablättern; Intensivierung der kapillaren Durchfeuchtung; Salzschäden Frostschäden (Absprengungen, Durchsprengungen) Absprengung von Gesteinsteilern; Durchsprengung Abbrüche; Ausbrüche; Durchbrüche Risse; Brüche Risse, Brüche in angeschlossenen Werksteinen Ausblühungen; Salzschäden (Gefügelockerung, Gesteinszerfall)

Faktoren	Verwitterungsrelevante Vorgänge	Verwitterungserscheinungen
10.1.7. Bautechnik	Akkumulation von Staub und Ablaufwasser auf vorstehenden Bauteilen (vgl. 5.2.3./5.2.6./5.2.7./6.1.) Freisetzung von Salzen und färbenden Lösungen aus mitverwendeten Baustoffen (vgl. 6.3.2.) Vgl. 2.	Vgl. 5.2.3./5.2.6./5.2.7./6.1. Vgl. 6.3.2.
10.1.8. Gesteinsauswahl	Mechanische Beanspruchung bei der Oberflächenbearbeitung	Vgl. 2.
10.2.1. Bearbeitung, Behandlung und Verbau	Mechanische Beanspruchungen bei der weiteren Bearbeitung (Dübelbohrungen, Ausfräsungen) Mechanische Beanspruchungen bei der Renovierung Imprägnieren durch chemisch wirksame Lösungen Behinderung des Feuchteaustausches durch verklebende Anstriche Beeinflussungen der Regen- und der Windwirkung sowie der Staubablagerung durch Exposition und Strukturierung der Bauteile (3.2./5.2.) Beeinflussungen durch mitverwendete Baustoffe (vgl. 10.1.7.) Aufbringen und Anlagerung von Fremdstoffen aller Art; Bereitstellen von Salzen und färbenden Stoffen Schläge und Stöße; mechanische Dauerbelastungen; Erschütterungen Schleifende Abnutzung von Werksteinen durch den Fußgängerverkehr	Mikrorisse; Gefügelockerungen; (Anlage zu Schalenbildungen) Ausbrüche Materialabtrag; (Gefügelockerungen) Verschmutzung; Verfärbungen; Ausblühungen; Salzschäden (Gefügelockerung, Schalenablösung) Ausblühungen; Salzschäden; Krusten- und Schalenablösungen Vgl. 3.2./5.2. Vgl. 10.1.7. Verschmutzungen; Ausblühungen; Salzschäden Risse; Ausbrüche; Durchbrüche Materialabtrag an Stufen- und Bodenplatten; (Politur)
10.2.2. Verschmutzungen		
10.2.3. Mechanisch verursachte Schäden		

5.1. Umfeld

5.1.1. Klima

München ist auf einer Höhe zwischen 480 und 580 m_{üNN} gelegen. Seine geographischen Koordinaten lauten: 48° 8' nördliche Breite, 11° 24' östliche Länge (Nordturm der Frauenkirche).

Die mittlere Jahreslufttemperatur beträgt etwa 8 °C, die jährliche Niederschlagshöhe erreicht im Mittel fast 1000 mm, die mittlere relative Luftfeuchtigkeit bewegt sich um 80 %.

Die angegebenen Werte kommen durch Mittelung der langjährig beobachteten Wetterdaten zustande. Dabei sind im täglichen und im jahreszeitlichen Wechsel starke Abweichungen von den Mittelwerten zu verzeichnen. Die sich im bayerischen Raum jeweils einstellenden Witterungslagen werden durch die im Jahresablauf unterschiedlich stark ausgeprägten Einflüsse von 4 Hauptklimazonen verursacht: Einem westlich-maritimen und einem östlich-kontinentalen Klima, dem nördlich-subpolaren und dem südlich-subtropischen Klima.

Betrachtet man allein die Niederschlags- und Verdunstungsverhältnisse, so ist das Klima in Bayern als humid zu bezeichnen: Im Jahresmittel übersteigt die Höhe des Niederschlags diejenige der Verdunstung.

In den Tabellen 20, 21, 22 und 23 sind Monats-, Jahres- und Durchschnittswerte einer Reihe von meteorologischen Meß- und Beobachtungsdaten wiedergegeben, die vom Deutschen Wetterdienst, Wetteramt München, in München-Riem gewonnen wurden. Weitere meteorologische Meßdaten werden in den Abschnitten 5.3., 5.4. und 5.5. in entsprechendem Zusammenhang vorgestellt.

Der Charakter des allgemeinen Großklimas, in dem sich die kurzzeitigen Schwankungen der einzelnen Klimaelemente ausmitteln, ist ausschlaggebend für die Vorgänge der natürlichen Verwitterung von Gesteinen, die sich über geologisch lange Zeiträume hinweg abspielen. Bei der Werksteinverwitterung sind dagegen wesentlich kürzere Zeitspannen zu beachten; hier werden die jahreszeitlichen, die täglichen und sogar die stündlichen Intensitäten der Witterungselemente mit ihren Schwankungen und gegenseitigen Beeinflussungen wichtig.

Monat	Luftdruck (Mittel)	Lufttemperatur (°C)					Bewölkungs- mittel ²⁾	Sonnen- schei- ndauer	Nieder- schlags- menge
		Mittel	absolut höchste	am	absolut tiefste	am			
		Stunden	mm						
Januar	954,4	-1,5	14,9	30. 1.66	-19,8	2. 1.71	6,1	58	54
Februar	952,9	0,0	19,8	23. 2.67	-18,2	22. 2.83	5,6	82	50
März	952,2	3,5	22,5	30. 3.68	-23,0	6. 3.71	5,4	126	55
April	951,4	7,2	27,6	22. 4.68	- 6,4	14. 4.73	5,2	159	75
Mai	953,0	12,1	29,8	79	- 3,0	1. 5.76	5,0	202	98
Juni	954,9	15,6	34,5	14. 6.80	1,5	3. 6.70	4,9	214	133
Juli	955,8	17,5	36,4	27. 7.83	4,6	23. 7.80	4,5	235	116
August	955,6	16,6	33,8	13. 8.66	4,1	78	4,5	207	119
September	956,6	13,5	30,4	16. 9.64	- 1,9	26. 9.72	4,5	173	74
Oktober	955,8	8,2	26,6	17.10.67	- 6,4	19.10.72	5,0	123	66
November	954,4	3,2	20,4	3.11.70	-14,9	25.11.75	6,0	69	66
Dezember	953,4	-0,5	15,7	79	-20,6	30.11.76	6,1	48	58

¹⁾ Beobachtungen des Deutschen Wetterdienstes, Wetteramt München, Beobachtungsstelle München-Riem, Höhe 527 m über N.N. - ²⁾ In Achtein der Himmelsbedeckung (0 = wolkenlos, 8 = bedeckt).

Tab. 20: Die meteorologischen Monatswerte in München im Jahresdurchschnitt 1964 - 1983 (aus: Statistisches Handbuch 1985)

Monat	Zahl der Tage									
	heiter	trübe	mit Nebel	Eistage (ständig unter 0°C)	Frost-tage (max 0°C)	Sommer-tage (max 25°C od. mehr)	mit Nieder-schlag	mit Schnee-fall	mit Schnee-decke	mit Ge-wittern
Januar	1	17	10	11	25	—	19	12	23	—
Februar	3	14	7	6	21	—	16	10	14	—
März	3	13	3	1	16	—	19	9	4	1
April	3	12	2	—	8	—	19	5	3	2
Mai	4	10	1	—	1	2	21	—	—	5
Juni	3	10	2	—	—	7	24	—	—	7
Juli	5	9	2	—	—	11	18	—	—	7
August	5	8	2	—	—	8	17	—	—	6
September	5	8	5	—	—	3	18	—	—	2
Oktober	4	11	10	—	5	—	15	1	—	—
November	1	16	8	4	15	—	17	7	5	—
Dezember	1	17	9	10	24	—	18	10	16	—

Beobachtungen des Deutschen Wetterdienstes, Wetteramt München, Beobachtungsstelle München-Riem, Höhe 527 m über N.N.

Tab. 21: Die monatlichen Hauptwitterungsmerkmale nach der Zahl der Tage besonderer Klimateigenschaften im Jahresdurchschnitt 1964 - 1983 (aus: Statistisches Handbuch 1985)

Kalender-Jahr	Zahl der Tage									
	heiter	trübe	mit Nebel	Eistage (ständig unter 0°C)	Frost-tage (max 0°C)	Sommer-tage (25°C oder mehr)	mit Nieder-schlag	mit Schnee-fall	mit Schnee-decke	mit Ge-wittern
Jahreswerte										
1973	44	148	46	34	144	31	182	76	69	31
1974	22	159	51	6	100	21	196	44	18	33
1975	40	135	55	13	120	31	164	37	46	39
1976	58	145	77	37	126	37	166	46	49	28
1977	21	148	78	25	88	21	189	54	53	32
1978	24	150	61	47	120	16	198	55	79	45
1979	31	141	60	22	121	29	195	74	64	30
1980	35	151	47	35	121	18	195	51	73	26
1981	29	142	52	40	111	35	209	80	86	23
1982	47	126	71	23	116	38	181	47	46	29
1983	49	119	51	30	108	54	173	47	57	36
1984	43	138	98	23	139	16	179	42	59	28

Tab. 22: Die Hauptwitterungsmerkmale nach der Zahl der Tage besonderer Klimateigenschaften (aus: Statistisches Handbuch 1985)

Jahr	Mittl. Luftdruck			Lufttemperatur			Mittl. relative Luftfeuchtigkeit	Bewölkungsmittel	Sonnenscheindauer		Niederschlagsmenge		Vorherrschende Winrichtungen ¹⁾								
	hPa	°C	Jahresdurchschnitt	Abw. v. Mittel ²⁾	Datum	°C			Datum	°C	%	Summe Stunden	Abw. v. Mittel ³⁾	Summe mm	Abw. v. Mittel ³⁾	häufigste Beobachtungen	%	zweithäufigste Beobachtungen	%		
a) Jahreswerte																					
1973	955.6	7.5	-0.4	3.12	-22.5	6.8	30.2	78	5.2	17.11	-	9	960	+ 13	SW	206	18.8	W	123	11.2	
1974	953.2	8.5	+0.6	14.12	-10.0	16.8	33.1	78	5.5	16.76	-	44	1065	+ 136	W	249	22.7	SW	203	18.5	
1975	955.5	8.1	+0.2	19.12	-18.5	17.9	30.0	79	5.1	17.59	+ 39	965	+ 18	SW	187	17.1	W	151	13.8		
1976	954.0	7.8	-0.1	30.12	-20.6	17.7	31.6	76	5.0	19.65	-151	796	-15	SW	242	22.0	O	148	13.5		
1977	953.6	8.4	+0.5	5.01	-14.2	10.6	30.2	79	5.6	15.67	-153	962	+ 15	SW	267	24.4	O	142	13.0		
1978	953.1	7.8	-0.6	18.2	-16.4	26.1	28.1	78	5.4	15.98	-122	937	-10	SW	296	27.0	W	142	13.0		
1979	952.8	7.9	+0.0	5.1.	-17.9	20.5	29.8	78	5.3	16.25	-158	1132	+185	SW	250	22.8	S	165	15.1		
1980	953.7	7.3	-0.6	2.12	-17.0	14.6	34.5	78	5.4	15.52	-160	1077	+130	W	226	20.6	SW	224	20.4		
1981	953.7	8.0	+0.1	9.1.	-16.9	12.8	29.4	78	5.4	16.90	-30	1180	+233	SW	270	24.7	W	206	18.8		
1982	955.3	8.3	+0.4	14.1.	-19.6	12.8	30.3	79	4.9	18.14	+ 94	875	-72	SW	241	22.0	O	167	15.3		
1983	956.6	8.5	+0.8	22.2	-18.2	27.7	36.4	77	4.8	18.93	+173	942	-5	W	230	21.0	SW	208	19.0		
1984	953.8	7.3	-0.6	13.2.	-16.8	11.7.	34.5	79	5.1	16.26	-	94	910	-37	W	221	20.1	SW	190	17.3	
b) Monatswerte 1984																					
Januar	950.5	0.5	+2.2	12.	-11.1	1/4/05	12.5	79	5.6	70	+ 11	47	-	5	W	39	41.9	SW	18	19.4	
Februar	955.8	-2.6	-2.1	13.	-16.8	5.	10.3	85	5.6	81	+ 3	45	-	9	SW	15	17.2	W	11	12.6	
März	952.0	1.2	-2.1	9.	-9.7	28.	17.8	76	4.3	15.8	+ 23	23	-	30	O	21	22.6	SW	17	18.3	
April	953.0	6.1	-1.4	5.	-4.1	23.	20.4	69	4.6	17.3	+ 10	43	-	30	O	18	20.0	SO/W	12	13.3	
Mai	948.0	10.4	-1.6	9.	-1.9	19.	23.1	74	5.5	14.9	-	56	92	-	7	W	22	23.7	O	17	18.3
Juni	952.8	14.2	-1.3	10.	4.6	3.	26.5	72	4.7	19.8	-	15	107	-	28	W	26	28.9	SW	20	18.3
Juli	957.3	16.4	-0.9	7/8.	6.0	11.	34.5	74	4.8	22.1	-	12	111	-	18	W	23	24.7	SW	17	22.2
August	956.2	16.3	-0.3	21/22.	6.9	3.	27.6	77	4.2	19.6	-	18	182	+ 50	SW	16	17.2	W	15	16.1	
September	950.8	12.2	-1.3	25.	5.3	3.	26.7	81	5.4	12.9	-	49	168	+ 85	SW	31	34.4	W	20	22.2	
Oktober	957.2	9.4	+1.2	31.	-2.2	19.	21.2	81	4.5	14.7	+ 16	25	-	33	SW	24	25.8	S	15	16.1	
November	950.4	3.4	+0.2	14.	-6.1	24.	17.4	89	5.9	6.1	-	2	41	-	16	O	30	33.3	N	12	13.3
Dezember	959.9	-0.1	+0.3	31.	-12.0	11.	9.8	92	6.1	4.3	-	5	46	-	6	O	19	20.4	W	15	16.1

¹⁾ Langjähriges Mittel der Jahre 1951 bis 1980 = 7.9°C. - ²⁾ in Abhängigkeit der Himmelsbedeckung (0 = wolkenlos, 8 = bedeckt). - ³⁾ Langjähriges Mittel der Jahre 1951 bis 1980 = 1720 Stunden. - ⁴⁾ Langjähriges Mittel der Jahre 1951 bis 1980 = 947 mm. - ⁵⁾ Nach 3 Beobachtungen möglich.

Tab. 23: Ausgewählte Beobachtungen des Deutschen Wetterdienstes, Wetteramt München (aus: Statistisches Handbuch 1985) (Beobachtungsstelle: München-Riem; Höhe: 527 m üNN)

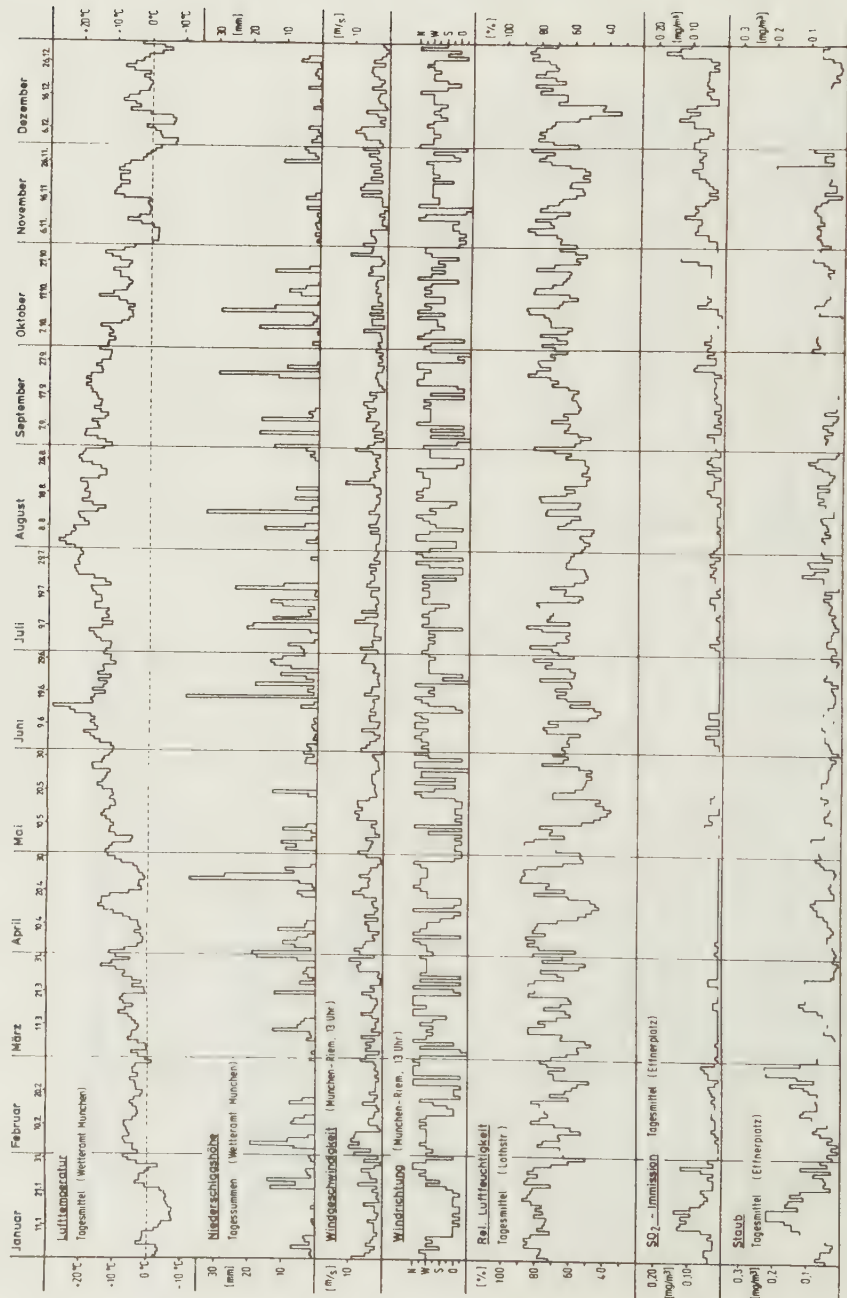


Abb. 7: Tagesmittelwerte einiger meteorologischer und lufthygienischer Kenngrößen im Jahresverlauf 1980 (nach Daten des Deutschen Wetterdienstes, Wetteramt München, und des Bayerischen Landesamtes für Umweltschutz zusammengestellt)

In Abbildung 7 sind die täglichen Mittelwerte von Lufttemperatur, Niederschlagshöhe, Windgeschwindigkeit und Windrichtung, der relativen Luftfeuchtigkeit sowie der SO_2 - und Staubimmission für den gesamten Jahresverlauf 1980 aufgezeichnet.

Im Großstadtbereich kommt nun noch zusätzlich einer Reihe von Abweichungen und Sonderformen des allgemeinen Klimas eine besondere Bedeutung zu. Einmal bewirken die städtische Bebauung, die Wirtschaftstätigkeit und der Verkehr eine Beeinflussung des äußeren Makroklimas hin zu einem "städtischen Mesoklima" (vgl. 5.10.1.). Zum zweiten ist innerhalb einer Stadt eine Vielzahl von räumlich eng begrenzten Mikroklimaten ausgebildet, verursacht durch Einflüsse der Bebauung, der Bepflanzung und offener Wasserflächen und erkennbar an speziellen Temperatur-, Feuchtigkeits- und Windverhältnissen (DITTMANN 1982).

An nahezu allen Teilen von Fassadenflächen herrschen während der meisten Zeit des Jahres quasi-aride Bedingungen: Die Niederschlagswässer laufen zum großen Teil unmittelbar nach Auftreffen auf den vertikalen Fassadenflächen ab. Die ins Gestein eindringende Feuchtigkeit wird in der Regel bereits nach kurzer Zeit wieder vollständig an die Luft abgegeben, wobei es zu den für den ariden Klimabereich typischen Schäden durch Salzverwitterung und Krustenbildung kommen kann.

Zeitweise können in begrenztem Ausmaß nivale Klimaverhältnisse verwirklicht sein: Niederschläge lagern sich dann als Eis und Schnee auf Fassadenteilen ab; es besteht die Möglichkeit zu Schädigungen durch Frostsprengung.

5.1.2. Baugrund

Die bei Tiefbaumaßnahmen im Münchner Innenstadtbereich zu beachtenden geologischen Gegebenheiten werden bestimmt durch die quartären Kiese der Münchner Schotterebene, durch die tertiären Sedimente der Oberen Süßwassermolasse ("Flinz") und durch das sich in beiden Einheiten befindende und bewegende Grundwasser.

Der tertiäre "Flinz" besteht aus unregelmäßig verfestigten, grünlich-grauen Sanden, Mergeln und Tonen, die im Miozän während des Baden und Sarmat als limno-fluviatile Aufschüttungen abgelagert worden sind. Die quartären Schotter entstanden während der Riß- (=Hochterrasse) und der Würmeiszeit (=Niederterrasse) in Form von breiten Schotterfächern, die sich, ausgehend von den Moränen vor allem des Inn- und des Isargletschers, zur Münchner Schotterebene zusammenschlossen. Es handelt sich dabei um graue, carbonatreiche Grobschotter in nur undeutlich geschichteter Lagerung.

Die Schotterebene im Bereich des Stadtgebietes ist gegliedert durch mehrere Terrassenstufen, die sich im Spätglazial ("Altstadtstufe") und im Holozän (Isarauen) in die Niederterrassenschüttung eingeschnitten haben. Als Relikt aus der Riß-Eiszeit zieht sich ein Stück lehmbedeckter Hochterrasse isarparallel von Ramersdorf im Süden bis Ismaning im Norden (Abb. 8). Das innere Stadtgebiet ist teils auf der Altstadtstufe, teils in den Isarauen angelegt. Die Kante zwischen beiden Terrassenflächen verläuft mit einem Höhensprung von einigen Metern entlang des Oberangers, des Viktualienmarktes, am Ostrand der Residenz und des Hofgartens vorbei nach Norden zum Englischen Garten hin. Im Bereich der Maximilianstraße ist diese Terrassenstufe durch eine künstliche Aufschüttung, auf der vor etwa 100 Jahren der gesamte Straßenzug errichtet wurde, verdeckt.

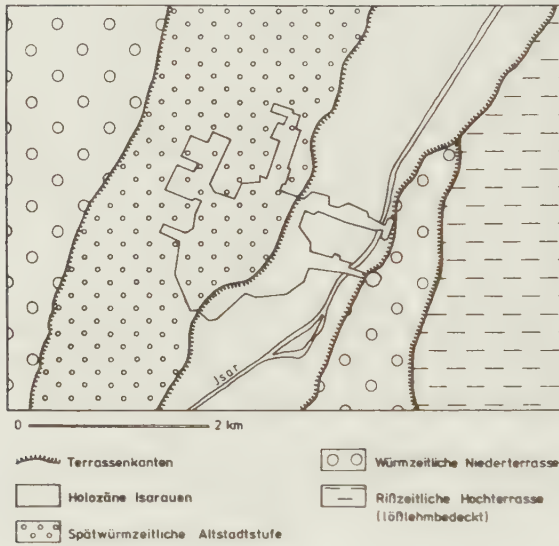


Abb. 8: Geologische Verhältnisse im zentralen Münchner Stadtgebiet

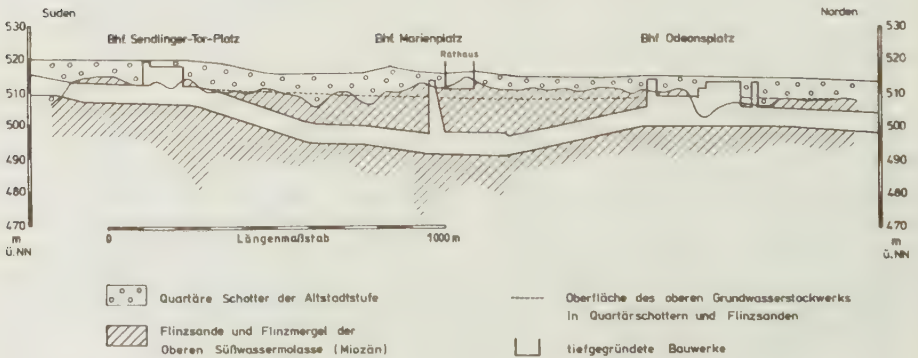


Abb. 9: Profilschnitt entlang der U-Bahn-Strecke zwischen Sendlinger-Tor-Platz und Odeonsplatz (nach GEBHARDT 1968)

Die Kiese der Altstadtstufe besitzen eine Mächtigkeit zwischen 3 und 7 Metern, je nach der örtlichen Höhenlage der Tertiäroberfläche. Im Bereich von breiten Rinnenausfüllungen kommen auch Mächtigkeiten bis zu 15 m vor. Die Schotter sind bis in Tiefen von 3 bis 6 m durch Baumaßnahmen umgelagert (GEBHARDT 1968). Tiefgegründete Bauwerke wie moderne Tiefgaragen, die Hauptstränge der Stadtkanalisation, U- und S-Bahn-Tunnel, aber auch die Fundamente des Neuen Rathauses binden in die bereichsweise wasserstauend ausgebildeten obersten Tertiärschichten ein (Abb. 9).

Das sich über dem Flinzmergel in den quartären Schottern und gelegentlich auch in den geringer durchlässigen Flinzsanden befindende obere Grundwasserstockwerk erfüllt die Quartärkiese normalerweise in Höhen zwischen 0 und 2 Metern, in den tieferen Rinnen bis zu 8 Metern. Der Flurabstand betrug vor 1953 nach der Karte von TILLMANN (1953) bei hohem Grundwasserstand noch etwa 5 Meter.

In früheren Zeiten stellten die reichlicher anfallenden Sickerwässer, das kapillar in Mauern aufsteigende Grundwasser, die nicht kanalisierten häuslichen Abwässer mit ihren gelösten Salzen sowie die zahlreichen Münchner Stadtbäche ein großes Gefährdungspotential für das Mauerwerk und die evtl. verbauten Naturwerksteine dar. Seit Mitte des letzten Jahrhunderts ist allerdings ein beständiges Absinken des Grundwassers festzustellen. Anlässe dazu gaben zunächst die Regulierung der Isar und der Ausbau der Kanalisation, später die zunehmende Überbauung, steigende Grundwasserentnahmen und schließlich die Auflassung der Stadtbäche. Das heutige Ausmaß der Bebauung und die fast vollständige Ableitung der Niederschläge durch die Kanalisation haben zur Folge, daß der Grundwasserstand unter dem Stadtgebiet nicht mehr an den natürlichen jahreszeitlichen Schwankungen teilnimmt (GEBHARDT 1968). Rasche Absenkungen des Grundwassers im Umfeld tiefer Baugruben können Bodensetzungen und entsprechenden Mauerwerksschädigungen zur Folge haben.

5.2. Gestein

Das Verhalten eines Gesteins gegenüber den Verwitterungsangriffen resultiert aus den Eigenschaften der Gesteinsmineralien und aus ihrer Anordnung und Bindung zueinander. Grundlegende Gesteinseigenschaften sind beispielsweise: Die Kornzusammensetzung, die Korngröße und Kornbindung, die Rohwichte und Reinwichte, die Porosität und die Porenradialverteilung. Materialeigenschaften, welche unmittelbar mit diesen Parametern in Zusammenhang stehen, sind beispielsweise die kapillare Wasseraufnahme, die Wasserdurchlässigkeit, die innere Oberfläche des Materials. Schließlich resultieren aus der Gesamtkonstellation der verschiedenen Parameter die Beständigkeiten gegen Frost, gegen Angriffe durch Säuren und Salze, gegen mechanische Beanspruchung durch Schlag, Druck, Biegung oder Schleifen sowie ganz allgemein die Beständigkeit gegenüber dem Verwitterungsangriff (DIN 52106).

Autoren wie QUERVAIN (1967), WAGENBRETH (1969), WINKLER (1975) und SCHÖN (1983), um nur einige wenige zu nennen, geben eine Fülle von quantitativ faßbaren Gesteinseigenschaften wieder. HIRSCHWALD (1912), NIESEL & SCHIMMELWITZ (1982) sowie die DIN-Ausgaben zur Prüfung von Naturstein befassen sich mit der Frage, welche speziellen Gesteinseigenschaften für den Ablauf und die Vorhersage des Verwitterungs geschehens von ausschlaggebender Bedeutung sein könnten.

Die Zahl der gesteinsbildenden Minerale und der Möglichkeiten ihrer Anordnung ist allerdings außerordentlich hoch. Berücksichtigt man die Schwankungsbreite der möglichen Reaktionsweisen des Materials auf die vielfältigen und komplex wirkenden Verwitterungseinflüsse, so wird der Satz in NIESEL & SCHIMMELWITZ (1982) verständlich, wonach es trotz aller Bemühungen bisher "noch nicht gelungen ist, eine Lösung des 'allgemeinen Ansatzes' für das Verwitterungsverhalten eines Baustoffes zu finden".

Die wichtigsten Mineralarten der Werksteine sind Silikatminerale, Carbonate und Tonminerale. Je nach Gesteinsausbildung und Art der äußeren Einflüsse werden die Materialeigenschaften auf unterschiedliche Weise verwitterungswirksam: Durch Auf- und Anlösung, durch Mineralum- und Neubildungen, durch Bereitstellung, Abgabe und Aufnahme färbender oder salzbildender Ionen, durch Dehnen, Quellen und Schrumpfen etc.

Das Gefüge der Gesteine ist durch Größe und Ausbildung der am Gesteinsaufbau beteiligten Minerale (=Struktur) sowie durch ihre räumliche Anordnung (=Textur) festgelegt. Dabei verhält sich ein Gestein mit kristallinem Gefüge anders als ein Mineralgemenge, das durch silikatische oder carbonatische Bindung oder durch Tonminerale bzw. Eisenverbindungen verfestigt ist; ein schichtiges Gestein anders als ein richtungslos-körniges.

Der Gesteinsporenraum setzt sich aus Hohlräumen zwischen den Mineralpartikeln, aus innerkristallinen Hohlräumen und Rissen sowie aus Hohlräumen, welche das Gesteinsgefüge insgesamt betreffen, zusammen. Das nach Geometrie, Zusammenhang und Größe der Hohlräume meist sehr komplex gestaltete Porenraumgefüge beeinflusst maßgeblich den Transport von Feuchtigkeit und gelösten Stoffen im Gestein (vgl. SOMMER 1971; KLOPPER 1979; SNETHLAGE 1984) und damit diejenigen Verwitterungsprozesse, die mit Durchfeuchtungs-, Austrocknungs-, Lösungs- und Kristallisationsvorgängen zusammenhängen.

Schließlich müssen Gefügestörungen erwähnt werden wie Klüfte, Stylolithenbahnen, Risse sowie Spannungszustände des aus seiner natürlichen Umgebung herausgelösten Werkstückes, die zu Schädigungen Anlaß geben können. Große und lagenweise gehäuft auftretende Gesteins Hohlräume setzen die mechanische Festigkeit herab.

5.3. Temperatur und Strahlung

Temperaturschwankungen spielen bei der Gesteinsverwitterung eine große Rolle, hauptsächlich durch Beeinflussungen der Gesteinsfeuchtigkeit. Das Verdunsten des Porenwassers und Austrocknen der Gesteine, das Kondensieren von Luftfeuchte, die Aus- und Umkristallisation von Krusten- und Ausblühungssalzen sowie das Gefrieren von Poren- und Ablaufwasser werden durch die jeweilige Höhe der Lufttemperatur und der Strahlungswärme gesteuert (vgl. auch 5.5. und 5.6.).

Als unmittelbare Wirkungen von Temperaturschwankungen sind Dehnungs- und Schrumpfungsvorgänge zu nennen sowie Gesteinszerstörungen, die durch außergewöhnlich hohe Temperaturen bei Bränden entstehen. Möglicherweise kommt der Lichtenergie eine gewisse Bedeutung bei der Ausbleichung grauer und schwarzer Carbonatgesteine sowie bei der Ansiedlung von Organismen zu.

5.3.1. Lufttemperatur

Abbildung 10 zeigt den Jahresgang der Lufttemperaturen in München im langjährigen Mittel. Aufgezeichnet sind die durchschnittlichen Monatsmittelwerte der 3 Dezennien von 1931 bis 1960, die Schwankungsbreiten der mittleren täglichen Maxima und Minima für den Zeitraum 1951 bis 1965 sowie die absolut höchsten und tiefsten gemessenen Temperaturen in den einzelnen Monaten von 1881 bis 1969. Die Lufttemperaturen der letzten 100 Jahre bewegten sich demnach über eine Spanne von annähernd 70 °C hinweg zwischen -32 °C und +37 °C, die Monatsmittelwerte in einem Bereich zwischen -3 °C und +18 °C. Das Jahresmittel der Lufttemperatur, berechnet aus den Monatsmittelwerten von 4 Meßstationen von 1931 bis 1960, beträgt 8 °C. In Abbildung 7 ist der Gang der Lufttemperaturen für das Jahr 1980 im Verlauf der täglichen Mittelwerte aufgetragen.

Im Durchschnitt der Jahre 1964 bis 1983 kamen in München pro Jahr 32 Eistage (Tage mit einem Temperaturmaximum unter 0 °C), 115 Frosttage (Tage mit einem Temperaturminimum unter 0 °C) und 31 Sommertage (Tage mit Lufttemperaturen über 25 °C) vor (vgl. Tab. 21).

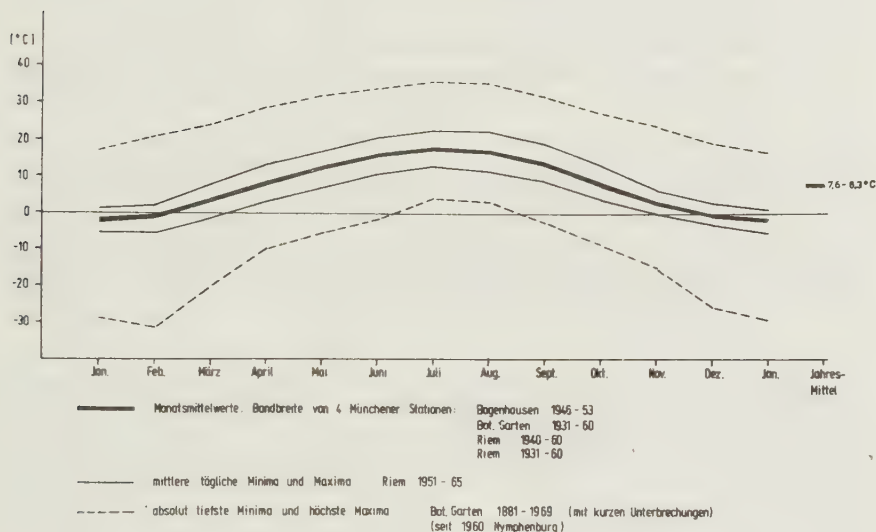


Abb. 10: Jahresgang der Lufttemperaturen in München im langjährigen Mittel (nach Daten des Deutschen Wetterdienstes, Wetteramt München)

5.3.2. Insolation

Mit "Insolation" wird die direkte Sonnenbestrahlung eines Körpers (Gesteins) bezeichnet. Die Strahlungsenergie wird beim Auftreffen auf eine Gesteinsoberfläche zum Teil reflektiert, zum Teil von den Mineralien absorbiert und in Wärme umgewandelt.

Als Werksteinschädigungen, die allein auf Wärmedehnung durch Insolation zurückzuführen sind, kommen in Frage:

- Auflockerung des Mineralgefüges durch Dehnen und Schrumpfen der Einzelpartikel mit oftmaligem Wechsel zwischen Druckaufbau und Entlastung.
- Rißbildungen, Schalenabplatzungen durch Spannungen zwischen der sich mit dem Temperaturverlauf bewegenden Gesteins-Oberflächenschicht und dem weitgehend inaktiven, inneren Gesteinskörper.
(Eine Verstärkung der Wirkung ist möglich durch schwarze Verkrustungen und Verschmutzungen sowie Verklebungen der Oberfläche.)
- Kantenabsprengungen am direkten Kontakt von Werkstücken durch beiderseitiges Ausdehnen und Erzeugung hoher Spitzendrücke an den Hauptkontaktpunkten.

- Verbiegungen, insbesondere von Marmorplatten, durch nicht vollständig reversible Mineraldehnungen auf den insolationsausgesetzten Seiten.
- Radialrisse in Fassadenplatten, ausgehend von eng eingepaßten Metalltüren oder Metallfensterrahmen. Die Wärmedehnung des Metalls verursacht radial von den Eckpunkten der Installationen aus verlaufende Risse.

Ein weiterer Effekt direkter Sonnenbestrahlung könnte sein:

- Ausbleichung der organischen Pigmente bestimmter farbiger Carbonatgesteine durch photochemische Reaktion (vgl. GRIMM 1984, S. 532).

Insgesamt von wohl größerer Bedeutung für die Gesteinsverwitterung als die direkten Auswirkungen der Insolation sind die mittelbaren Einflüsse:

- Gefügelockerungen durch Veranlassung hygrischer Schrumpfungen beim Austrocknen der äußeren Gesteinsschicht und hygrischer Dehnungen beim Wiederaufnehmen der Feuchtigkeit.
- Intensivierung von Salzschäden durch Verstärkung der Verdunstung und des Kapillarwasserdurchsatzes und Veranlassung von Umkristallisationen der Ausblühungssalze von einer Hydratstufe in eine andere und zurück (vgl. 6.2.4.).

Eine Berechnung der durch Insolation an einer Bauteilfläche entstehenden Wärme ist aufgrund der vielen mitbeteiligten Faktoren (Windbewegung, Feuchtigkeitsgehalt der Luft und des Gesteins, Oberflächenbeschaffenheit des Gesteins, Schmutzbedeckung, lokale Beschattung etc.) kaum möglich. In den Tropen wurden an Gesteinsoberflächen Temperaturen bis zu 84 °C gemessen (SCHEFFER & SCHACHT-SCHABEL 1976, S. 11). WIHR (1980, S. 42) gibt für sonnenbeschienene Fassaden in Mitteleuropa einen Meßwert von 65 °C an. In DITTMANN (1982) ist nach FRANKE (1977) eine Oberflächentemperatur von 70 °C für eine schwarzfarbige Westfassade angegeben; eine gleichexponierte weiße Fläche erreicht danach lediglich 35 °C durch Insolation bei einer umgebenden Lufttemperatur von 25 °C.

Wie alle festen Körper dehnen sich Gesteine bei Erwärmung aus. Für die resultierenden Volumenänderungen sind die Ausdehnungskoeffizienten der Minerale und Gesteine maßgebend, für die Höhe der sich durch Wärmedehnung evtl. entwickelnden Druckspannungen die Kompressibilitätskoeffizienten der Materialien.

Die Erwärmung und Ausdehnung des Gesteinsmaterials erfolgt zunächst in jedem Mineral für sich. Bei den nicht kubischen Mineralen muß mit anisotropem Verhalten, d.h. mit unterschiedlich großen linearen Dehnungen in den verschiedenen Kristallachsenrichtungen gerechnet werden. Schließlich wirken die Gesteine als ganzheitliche Körper mit eigenen, meßbaren Ausdehnungsbeträgen.

Tab. 24: Lineare Ausdehnungsbeträge einiger Gesteinsarten

(bezogen auf eine Temperaturerhöhung um 50 °C; nach WITTMANN in WEBER 1980)

Granit	0,2 - 0,3 mm/m
Kalkstein	0,08 - 0,3 mm/m
Sandstein	0,2 - 0,3 mm/m

Die linearen Ausdehnungsbeträge in Tab. 24 geben Hinweise auf die Größenordnung der Formänderungen durch Temperaturschwankungen. Hierbei ist eine Temperaturdifferenz von 50 °C zugrunde gelegt; sie entspricht einem wohl maximal möglichen täglichen Temperaturunterschied im Sommer zwischen ca. 10 °C nächtlicher Lufttemperatur und ca. 65 °C Oberflächentemperatur einer sonnenbeschienenen Fassade. Die thermischen Dehnungen betragen unter diesen Bedingungen bei einer Werkstücklänge von 1 m wenige Zehntel Millimeter, bei einer Stücklänge von 1 cm wenige μm . Quarz, als ein Mineral mit einem vergleichsweise hohen räumlichen Ausdehnungskoeffizienten (2 bis 3 mal höher als Feldspäte oder Calcit) kann bei einer Temperatursteigerung um 40 °C einen Druck von 54,5 MN/m² erzeugen. Die Zugfestigkeiten der Gesteine liegen im Bereich von 1 bis 40 MN/m².

Im Gegensatz zur Lufttemperatur, die ja allseitig auf alle Bauteile gleichermaßen wirkt, können Gesteinserwärmungen durch Insolation nur auf sonnenbeschienenen Werkstücken auftreten. Verwitterungsschäden durch Insolation müßten sich demnach auf südexponierten Fassadenseiten häufen und dürften auf nordexponierten nicht vorhanden sein.

Bei den direkten Schädigungen durch Materialdehnung müßten auch die Expositionen der einzelnen Flächen eines Werkstückes von Bedeutung sein; Verwitterungseffekte können sich gerade aus dem Gegensatz zwischen den besonnten und den angrenzenden, nicht besonnten Flächen ergeben.

Dagegen spielen im Falle von mittelbaren Insolationseffekten die Werksteinexpositionen im Detail eine weniger entscheidende Rolle. Hier trägt die insgesamt vor der Fassadenfläche erwärmte Luft zur Austrocknung aller Bauteile bei. An den am Nachmittag besonnten Westfassaden dürften die Wirkungen am stärksten sein, da die Insolation dort bei im Tagesverlauf ansteigenden Lufttemperaturen auf bereits vorgewärmte und vorgetrocknete Gesteine trifft.

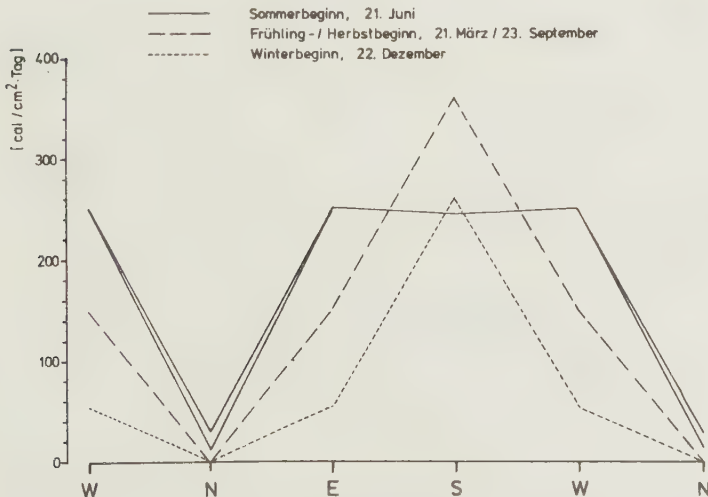


Abb. 11: Astronomisch maximal mögliche Strahlungsmengen (Tagessummen) durch Insolation auf verschieden exponierte Fassadenflächen
(Die Doppellinie für nordexponierte Flächen am 21. Juni erklärt sich durch 2-malige - morgendliche und abendliche - Besonnung.)

In Abb. 11 sind die astronomisch maximal möglichen Tagessummen der Insolationstrahlungsmengen auf verschieden exponierte, vertikale Fassadenflächen zu den Zeitpunkten des Sommer-, Herbst-, Winter- und Frühlingsbeginns angegeben. Bei der Berechnung der Strahlungsmengen für die N-, E-, S- und W-orientierten Flächen wurde die sehr günstige Einstrahlungsenergie von $1,5 \text{ cal/cm}^2\text{min}$ zugrunde gelegt (angenommen für die Mittagszeit in 50° nördlicher Breite, für eine Höhe von 500 m üNN und völlig klare, wasserdampffreie und saubere Luft). Die einer Flächeneinheit zugute kommende Strahlungsmenge nimmt mit dem Sinus des Einstrahlwinkels ab. Bei der Aufaddierung der Werte zu den Tagessummen müssen die Extinktion, die Schwächung der Strahlung bei niedrigem Sonnenstand durch die Atmosphärenteilchen und der sich jahreszeitlich und im Tagesverlauf mit dem Sonnenstand ändernde Einstrahlwinkel berücksichtigt werden (vgl. ROEDLER 1948, 1953; TONNE 1951).

Wie aus Abb. 11 hervorgeht, ist auf nordexponierter Seite eine Insulationsbestrahlung überhaupt nur im Sommer möglich, die auch dann von vernachlässigbarer Bedeutung ist. Die west- und die ostexponierten Seiten erhalten jeweils gleiche Strahlungsmengen, wobei im Winter die geringsten, im Sommer die höchsten Werte auftreten können. Auf den Südseiten können höchste Werte im Frühling und im Herbst erreicht werden. Dort kann die Insolationswirkung im Winter sogar etwas intensiver sein als im Sommer durch den winterlich flacheren Sonnenstand und den dadurch günstigeren Einstrahlwinkel.

Insolation kann nur wirksam werden, wenn der Weg der direkten Sonnenstrahlung nicht durch Wolkenbildungen blockiert ist. Wie die mittleren Monatssummen der Sonnenscheindauer in Abbildung 12 ausweisen, ist in München im Sommer im Mittel an knapp 50 %, im Winter an etwa 20 % der Tagesstunden Gelegenheit zur Insolation gegeben.

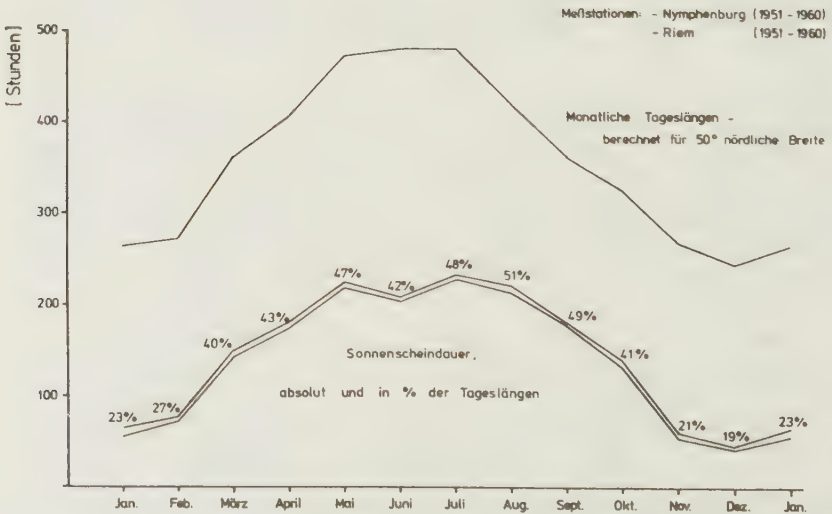


Abb. 12: Mittlere Monatssummen der Sonnenscheindauer in München
(nach Daten des Deutschen Wetterdienstes, Wetteramt München)

Aber auch bei Sonnenschein werden die astronomisch möglichen Insolationsstrahlungsmengen, zumal in einer Großstadt, kaum verwirklicht. Die Staubbelastung der Luft, gasförmige Luftverunreinigungen und die Luftfeuchtigkeit vermindern die Wirksamkeit der zur Verfügung stehenden Energiemenge beträchtlich. Lokale Beschattungen durch benachbarte Bauteile und Gebäude, Baubestand, Verkehrsbauten etc. können eine mögliche Bestrahlung zeitweise oder ganz verhindern.

5.3.3. Brandwirkung

In München stellen Brandschäden an Naturwerksteinen eine Rarität dar. Einige Denkmalsteine auf dem Alten Südfriedhof zeigen scherbige Absprengungen an den Oberflächen, Durchsprengungen von ganzen Quadern sowie Gefügezerstörungen, welche durch andere Schadensursachen nicht erklärbar sind (vgl. POSCHLOD 1983). Diese sowie wahrscheinlich auch alle anderen heute in München feststellbaren Brandschäden an Werksteinen sind als Folge der Luftangriffe vor allem des Jahres 1944 entstanden. Aus der Zeit der großen Stadtbrände im 14. und 15. Jahrhundert - 1327 wurde ein Drittel der damaligen Stadt zwischen dem Alten Hof und dem heutigen Rindermarkt zerstört - existieren heute keine Werksteine an den Außenfassaden mehr. Und auch von den jüngeren Großbränden im 18. Jahrhundert (Residenz), von 1823 (Nationaltheater) oder 1931 (Glaspalast) sind keine Werksteinreste bekannt, die entsprechende Schäden aufweisen.

Je nach dem freigesetzten Energieinhalt der verbrennenden Stoffe entwickeln sich bei Großbränden Temperaturen von einigen hundert bis zu 1000 °C. Die Schäden an Gesteinen treten dabei nicht nur durch die entstehende Hitze ein, sondern können auch durch die folgende Abkühlung, etwa durch Löschwasser, verursacht werden:

- Große und schockartig einsetzende Temperaturspannungen zwischen der noch kühlen Kernzone und der relativ rasch erhitzten Randzone eines Gesteinskörpers führen zu Absprengungen und Absplitterungen der Gesteinsoberfläche (FEIX & SCHULZE 1975).
- Die in den Gesteinsporenräumen enthaltene Feuchtigkeit entwickelt bei plötzlich auftretenden Temperaturen von mehr als 100 °C einen Dampfdruck, der unter Umständen Sprengwirkungen auf das Gesteinsgefüge ausüben kann (FEIX & SCHULZE 1975).
- Quarz erfährt bei Aufheizung über 573 °C bzw. über 870 °C Kristallstrukturänderungen von Tiefquarz zu Hochquarz bzw. zu Tridymit, von denen letztere mit beträchtlicher Volumenausdehnung verbunden ist.
- Kalk kann bei Temperaturen von über 540 °C zu "Brennen" beginnen (im technischen Prozeß bei 900 - 1000 °C): $\text{CaCO}_3 = \text{CaO} + \text{CO}_2$.

In Verbindung mit Löschwasser kann dann "gelöschter Kalk" (Ca(OH)_2) entstehen, der unter Wärmeentwicklung und Volumenzunahme zu einem feinen Pulver zerfällt.

5.4. Luft und Luftbewegung

Die reine Atmosphärenluft besteht zu 78 Vol% aus Stickstoff (N_2), zu 21 % aus Sauerstoff (O_2), zu 1 % aus Argon (Ar) und zu 0,03 % aus Kohlendioxid (CO_2). Direkten Einfluß auf Verwitterungsvorgänge nehmen von diesen Stoffen der Sauerstoff bei Oxidationsprozessen und das Kohlendioxid in wäßriger Lösung als kalkaggressive Kohlensäure.

Die Luft wirkt aber auch als Träger und Transportmittel für Feuchtigkeit, Stäube und gasförmige Immissionen. Wichtig für die räumliche Verteilung dieser Stoffe ist die Luftbewegung, die ausgelöst wird durch regionale Unterschiede des Luftdrucks und die für einen bestimmten Ort in Form von Windrichtung und Windstärke meßbar und darstellbar ist.

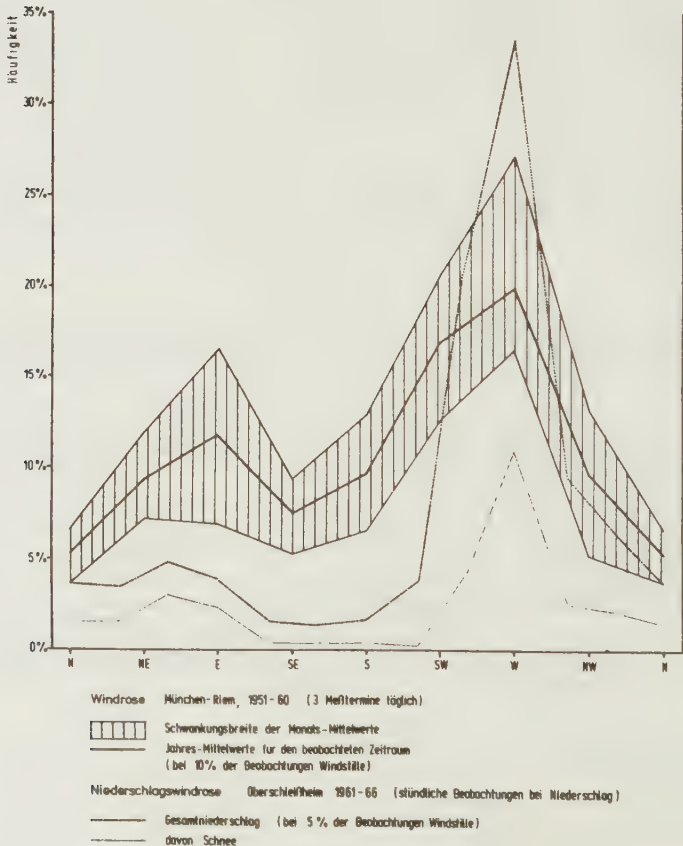


Abb. 13: Windrose und Niederschlagswindrose

In Abbildung 13 sind die mittleren Häufigkeiten der in München-Riem im Zeitraum 1951 bis 1960 gemessenen Windrichtungen aufgetragen. Man erkennt 2 Maxima, eines im Bereich östlicher Richtungen, ein zweites und ausgeprägteres im westlichen Sektor. Die gleichzeitig abgebildete Niederschlagswindrose für Oberschleißheim zeigt die bei Niederschlagsereignissen im Zeitraum von 1961 bis 1966 aufgetretenen Windrichtungen. In fast 75 % der Beobachtungen wurden die Niederschläge aus westlichen Richtungen herangebracht. Diese Tatsache ist bedeutsam für die zum großen Teil expositionsabhängige Entwicklung von Verschmutzungen und Verkrustungen sowie von rauh gewitterten und abgespülten Flächen (vgl. 6.3.3.).

Untersucht man die Zusammenhänge zwischen Windrichtung und Schadstoffbelastung, so zeigen sich in den Jahresmittelwerten der SO_2 -Belastung der Luft kaum windrichtungsabhängige Maxima, wie aus Abb. 14 für das Beispiel der SO_2 -Immissionen an der Meßstation Lothstraße hervorgeht. Ein Zusammenhang besteht dagegen zwischen der Schadstoffbelastung und der Windstärke: Die höchsten Mittelwerte der SO_2 -Immissionen treten bei Windstille auf, ein Hinweis darauf, daß die Schwefeldioxid-Belastung überwiegend im Stadtgebiet selbst erzeugt wird. Verringerte Immissionswerte in Zeiten westlicher und östlicher Winde sind auf die gleichzeitig im Mittel höheren Windstärken (vgl. Abb. 15) zurückzuführen.

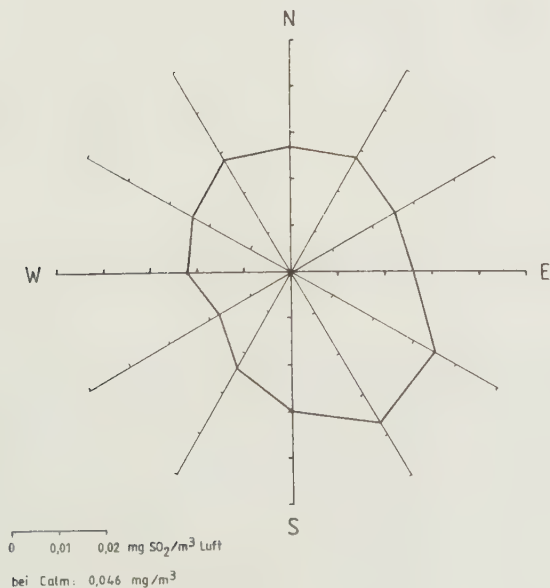


Abb. 14: Mittlere SO_2 -Belastung der Luft bei verschiedenen Windrichtungen (Jahresmittelwerte mg SO_2/m^3 Luft für 1979 bis 1981; Meßstation Lothstraße; nach Daten des Bayerischen Landesamtes für Umweltschutz)

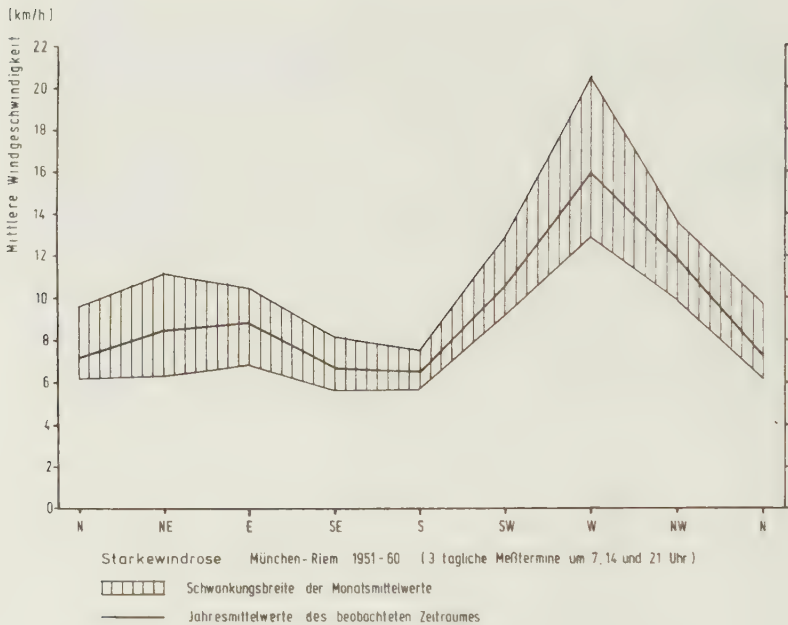


Abb. 15: Starkewindrose München-Riem 1951-1960 (Mittelwerte)
(nach Daten des Deutschen Wetterdienstes, Wetteramt München)

Richtung	Stufenwerte der Beaufortskala (km/h)							Summe (%)	Mittl. Windgeschw. (km/h)
	1 - 5	6 - 11	12 - 19	20 - 28	29 - 38	39 - 49	> 49		
N	24	20	7	2	0	-	-	53	7,1
NE	34	34	19	5	1	-	-	93	8,4
E	41	41	23	9	2	0	-	116	8,8
SE	37	29	8	1	0	0	-	75	6,7
S	49	36	9	1	0	-	-	95	6,5
SW	47	63	34	16	7	2	0	169	10,5
W	28	50	50	39	22	8	2	199	15,9
NW	22	31	27	12	4	1	0	97	11,8
Windstille	103							103	-
Summe der Beobachtungen (%)	385	304	177	85	36	11	2	1000	8,7

(0 = aufgetreten, aber Häufigkeit kleiner als 0,5 %))

Tab. 25: Starkewindrose München-Riem 1951-1960 (Zahl der Beobachtungen)
(Tägliche Meßtermine: 7, 14 und 21 Uhr; Meßhöhe: 7 m über Gelände)
(nach Daten des Deutschen Wetterdienstes, Wetteramt München)

Die mittleren Windgeschwindigkeiten in München betragen zwischen etwa 6 und 20 km/h, wobei ähnlich wie bei der Niederschlagswindrose ein Maximum bei westlichen Windrichtungen ausgeprägt ist (Abb. 15). Auch die zwischen 1951 und 1960 beobachteten höchsten Windgeschwindigkeiten mit über 50 km/h wurden bei Westwind gemessen (Tab. 25).

Durch Windlasten entstehen Zugbeanspruchungen an den Verdübelungen der Traganker von Fassadenplatten; außerdem vermag es der Anstrom des Windes, Niederschlagsfeuchte tief in die Hohlräume der Gesteine, in Risse und Fugenspalten einzudrücken, Staub aufzuwirbeln und an die höheren Fassadenflächen heranzutragen sowie die Gesteinskorrasion voranzutreiben.

Bei der Konstruktion von Fassaden und Dächern muß die Windlast für den höchsten 20-Jahres-Wind, d.h. für etwa 30 m/s oder 100 km/h Windgeschwindigkeit in Bauwerkshöhen von 0–10 m (Windlast = $0,6 \text{ kN/m}^2$) und für 35 m/s oder ca. 125 km/h in Höhen bis 20 m (Windlast = $0,96 \text{ kN/m}^2$ bei senkrechter Anströmung) berücksichtigt werden.

Nach L.G.A. (1980) wird der Ausbruch von Ankerdornen in Fassaden durch ein Versagen der Gesteinszugfestigkeit verursacht. Aufgrund der schwer zu ermittelnden Zugfestigkeiten behilft man sich bei der Materialprüfung mit der Feststellung der Biegefestigkeit nach DIN 52 112. Die von KRAUS in L.G.A. (1980) bestimmten Werte für Granit, Muschelkalk und Plattensandstein (Tab. 26) übersteigen in allen Fällen die Werte für die höchst anzunehmenden Windlasten. Werden Ankerdornausbrüche dennoch durch Windwirkung hervorgerufen, so sind die Ursachen in einem fehlerhaft durchgeführten Verbau oder in einem partiell-weise ungünstigen Gesteinsgefüge zu suchen (vgl. Biegefestigkeit von Quaderkalk senkrecht und parallel zur Schichtung in Tab. 26).

Tab. 26: Biegefestigkeiten verschiedener Gesteine

ermittelt nach DIN 52 112 (nach KRAUS in L.G.A. 1980)

Granit	17,0 MN/m ²
Plattensandstein	9,1 MN/m ²
Quaderkalk (parallel zur Schichtung)	1,9 MN/m ²
Quaderkalk (senkrecht zur Schichtung)	10,0 MN/m ²

5.5. Wasser

Die Wirkungen des Wassers auf die Verwitterung von Werksteinen sind aufgrund der zahlreichen verschiedenen Erscheinungsformen am Bauwerk und aufgrund der besonderen physiko-chemischen Eigenschaften des Wassers als Lösungsmittel und als kapillar in Baustoffe eindringende Flüssigkeit äußerst vielfältig. Bei weitgehendem Mangel an Wasser reduziert sich die Verwitterungsaktivität erheblich, wie eine Reihe von Steinbauwerken Altägyptens beweist, die in ihrer Substanz einige Jahrtausende überdauert haben.

In den folgenden Abschnitten sollen die verschiedenen Erscheinungsformen und Wirkungen des Wassers am Bauwerk aufgezeigt werden. Dabei ist nur untergeordnet von den Inhaltstoffen des Wassers die Rede, die unter 5.6. behandelt werden.

5.5.1. Luftfeuchtigkeit

Am unauffälligsten, aber in bezug auf die Verwitterung mit am wirkungsvollsten, erscheint das Wasser in Form der Luftfeuchtigkeit. Abhängig vom Wasserangebot und der Lufttemperatur ist immer eine mehr oder weniger große Menge an dampfförmigem Wasser in der Luft enthalten, im Normalfall etwa 0,1-0,2 Vol%. Wird bei einer Abkühlung der Luft oder bei einer H_2O -Zufuhr der temperaturabhängige Wasserdampf-Sättigungswert der Luft überschritten (am Taupunkt = 100 % relative Luftfeuchte), so schlagen sich die Wassermoleküle an Kondensationskeimen, also auch an den Außenflächen und an den Porenwandungen der Gesteine, in Form von Wassertröpfchen und Wasserfilmen nieder.

Auch unterhalb des Taupunktes ist in der Regel eine gewisse Mindestfeuchtigkeit in den Baustoffen enthalten, die Gleichgewichts- oder Dauerfeuchtigkeit, deren Höhe sich nach der Porosität des Gesteins und den hygroskopischen Eigenschaften der enthaltenen Minerale im Zusammenspiel von Wasserdampfdiffusion, Kondensation, Verdunstung und kapillarer Saugspannung einstellt.

Die Anlagerung von Wassermolekülen innerhalb poröser Systeme bei steigender relativer Feuchte wird als Sorption bezeichnet, die Abgabe von Wasser bei sinkender Feuchte als Desorption. SNETHLAGE (1984) konnte nach Untersuchungen an verschiedenen Sandsteinen berechnen, daß bis zu einer relativen Feuchte von etwa 80 % etwa 4 H_2O -Lagen sukzessive an die Porenwandungen angelagert werden. Bei höherer Luftfeuchtigkeit kann die Dicke des Wasserfilms auf mehr als 15 Molekül-Lagen anwachsen. Porenräume unter 0,1 μm Ausdehnung können sich durch Kapillarkondensation ganz mit Wasser aus der Luftfeuchtigkeit füllen, obwohl auf freien Flächen keine Kondensation möglich ist.

Die adsorbierten Wassermengen betragen bei Sandstein-Probekörpern im Mittel 1,0 Gew.%, maximal bis 2,5 Gew.%. Sind hygroskopische Stoffe, wie sie die Mehrzahl der Ausblühungssalze darstellen, im Gestein vorhanden, kann sich die Aufnahme von Wasser aus der Luftfeuchtigkeit stark erhöhen. Die meist in mehreren Hydratstufen existierenden Salze versuchen, in ihrer Umgebung ein Feuchtegleichgewicht nach Maß ihres Sättigungsdampfdruckes auszubilden. Bei höherem äußeren Dampfdruck erfolgt zunächst Hydratisierung und dann die Lösung im hygroskopisch angelagerten Wasser, bei niederem äußeren Dampfdruck Kristallwasserabgabe und schließlich Auskristallisation.

Wie alle Gase wandert Wasserdampf von Stellen höherer Konzentration zu Stellen niedrigeren Wasserdampf-Partialdruckes. Poröse Stoffe, also die Gesteine, setzen dieser (Wasser-) Dampfdiffusion einen Diffusionswiderstand entgegen, der zahlenmäßig im Verhältnis zum Widerstand einer ruhenden Luftschicht gleicher Dicke (= 1) angegeben wird. Ist das Dampfdruckgefälle hoch, kann bei gleichzeitig hohem Diffusionswiderstandsfaktor Kondensation des Wassers im Baustoff einsetzen. Da die Verkleidungsmaterialien meist dampfdichter als die Mörtelmassen sind, sollen Fassadenbekleidungen möglichst mit Fugen oder hinterlüftet angebracht werden, um Dampfentspannung und die Abfuhr des Kondensates zu ermöglichen (TRASSL 1976).

Beim Verdunsten von Gesteinsfeuchtigkeit gehen Wassermoleküle von der flüssigen in die gasförmige Phase über. Es ist anzunehmen, daß an Bauwerksflächen, die durch Regenfall oder kapillar aufgenommene Feuchtigkeit durchnäßt sind, infolge der Luftbewegung ständig Wasserteilchen in die Dampfform übergehen. An nicht durchnäßten Bauteilen sind Verdunstungsbedingungen immer dann gegeben, wenn die äußere Luftfeuchtigkeit unter den Wert der Gleichgewichtsfeuchtigkeit des Gesteins absinkt. Die Wassermoleküle werden an der Außenfläche der Werkstücke von der Luftbewegung mitgerissen, ihr Verlust durch Nachschub aus dem Gesteinsinneren ausgeglichen. Solange im Porenraum genügend Wasser zur Verfügung steht, erfolgt der eigentliche Verdunstungsvorgang an oder in unmittel-

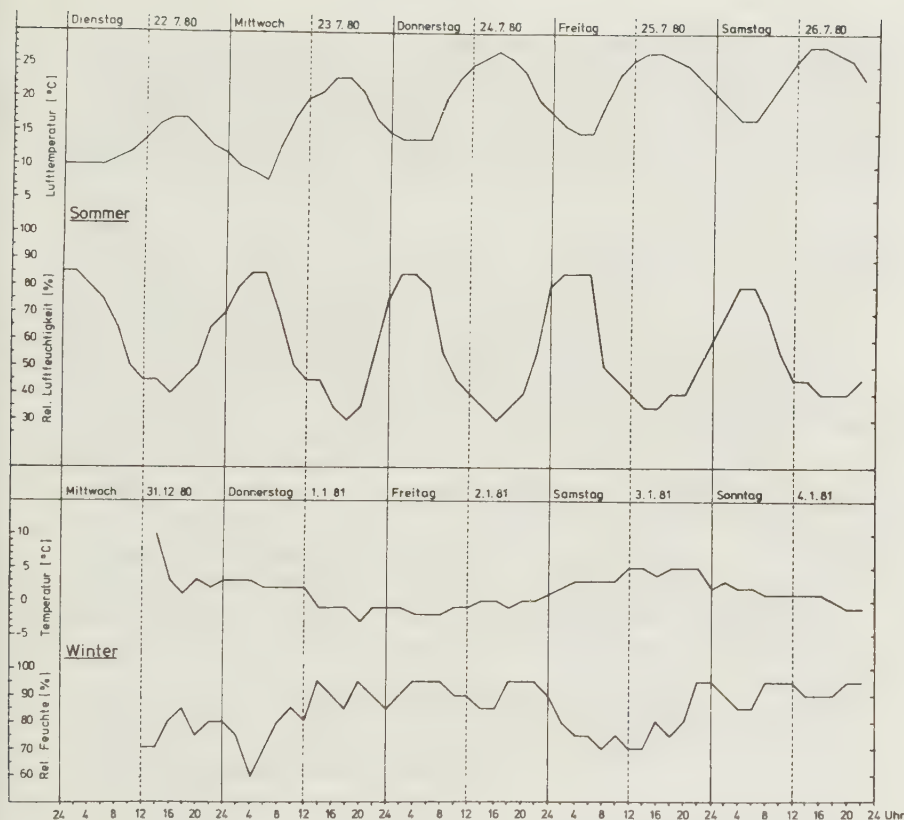


Abb. 16: Typische Verläufe von Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit für einige Sommer- und Wintertage (Meßstation: München-Bavariaring)
(nach Daten des Deutschen Wetterdienstes, Wetteramt München)

barer Nähe der Gesteinsoberfläche. Bei anhaltender Verdunstung verlagert sich die Verdunstungsfront immer tiefer in das Gestein hinein, die Austrocknungsgeschwindigkeit nimmt dabei ab.

In Abb. 7 läßt sich der Gang der relativen Feuchte in München für das Jahr 1980 verfolgen. Aufgetragen sind die Tagesmittelwerte. Man erkennt die Schwankungen der Luftfeuchtigkeit im Bereich zwischen 40 und etwa 80 %, wobei im Sommer bei angestiegenen Temperaturen die höheren Feuchtwerte seltener auftreten.

Wichtiger für das Verwitterungsgeschehen an den Werksteinen sind jedoch die tageszeitlichen Schwankungen der Luftfeuchtigkeit, wie sie in Abb. 16 beispielhaft für jeweils einige Tage einer hochsommerlichen und einer winterlichen Witterungslage der Jahre 1980 und 1981 in Abhängigkeit von der Lufttemperatur aufgezeichnet sind: Im Sommer nimmt der Temperaturverlauf einen ausgeprägten Tages-

rhythmus an mit hohen Werten am Nachmittag und einer Abkühlung um jeweils 10 °C in der Nacht. An der Verlauf gekoppelt ist mit umgekehrten Vorzeichen der Gang der relativen Feuchte: Sie ist gering während der hohen Tagestemperaturen und am höchsten in den kühleren Nachtstunden. Im Winter fehlen aufgrund der weniger intensiven Einstrahlung ausgeprägte, tageszeitliche Temperaturschwankungen; die Höhe der Luftfeuchtigkeit paßt sich dem ungleichmäßig, über mehrere Tage hinweg schwankenden Gang der Temperatur an.

Schwankungen der Luftfeuchtigkeit, dadurch ausgelöste Befeuchtungs- und Trocknungsvorgänge an den Außenflächen und im Porenraum von Naturwerksteinen können für eine Reihe von Verwitterungsvorgängen von größter Bedeutung sein:

- Werden Werkstücke aus ihrem natürlichen Verband im Steinbruch gelöst, beginnt in aller Regel ein Prozeß der Austrocknung. Werkstücke am Bauwerk enthalten im Normalfall weit weniger Feuchtigkeit als bruchfrisches Material. Dieser Wasserverlust kann auch durch die zeitweise Aufnahme von Regen- oder Luftfeuchtigkeit im langfristigen Mittel nicht mehr ausgeglichen werden. Als Folgen der Austrocknung, die besonders die der Strahlung und dem Wind ausgesetzten oberflächennahen Gesteinsbereiche erfaßt, können Materialschrumpfungen und erste Gefügelockerungen eintreten und Möglichkeiten für weitere Verwitterungsangriffe eröffnet werden.
- Bei der Aufnahme von Wasser in Baustoffe sind Dehnungen der Materialien zu beobachten, bei ihrer Austrocknung Schrumpfungen (hygrische Längenänderungen). Die auftretenden Werte sind nicht ganz unerheblich und erreichen etwa den Bereich der durch Temperaturänderungen ausgelösten Verformungen (Tab. 27; vgl. auch Tab. 24).

Tab. 27: Hygrische Längenänderungen einiger Gesteinsarten

(bezogen auf eine Differenz von 50 % r.F. (50 % auf 100 %);
Werte aus: TRASSL 1976)

Granit	0,06 - 0,18 mm/m
Kalkstein	0,10 - 0,16 mm/m
Sandstein	0,30 - 0,60 mm/m

Betrachtet man die Zahlen der Tabellen 24 und 27, so sollten sich hygrische und thermische Volumenänderungen in ihrer Wirkung zumindest teilweise gegeneinander aufheben können, indem erhöhte Temperaturen (etwa durch Insolationsstrahlung) zwar zu thermischer Dehnung, gleichzeitig aber über die Austrocknung auch zu hygrischer Schrumpfung führen müßten. Tatsächlich ist das Gefüge vieler Gesteine aber nicht als homogen anzusehen, so daß die unterschiedlichen Reaktionsweisen von Hauptkomponenten und Matrix, von ton- und carbonatreicheren Partien, von einzelnen Schichtlagen untereinander etc. auf Erwärmung, Durchfeuchtung und Trocknung zu Gefügelockerungen Anlaß geben dürften.

- Innerhalb der Schwankungsbreite der Tages- und Jahrestemperaturen in München existieren die meisten leicht löslichen und bauschädlichen Salze in mehreren Hydratstufen. Mit steigender Temperatur geben die einzelnen Salze stufenweise bestimmte Anteile an Wassermolekülen an die Umgebung ab; mit sinkender Temperatur nehmen sie allerdings nur dann wieder Wasser auf, wenn das Feuchteangebot ausreichend hoch ist.

So kann bei gleichbleibender Temperatur ein Salz bei einer relativen Feuchte von unter etwa 30 % Kristallwasser abgeben (Dehydration) und dieses bei 60–80 % Feuchte wieder aufnehmen (Hydratation). Besonders im Sommer ist damit zu rechnen, daß die bei den vorherrschenden Lufttemperaturen bis 30 °C eigentlich stabilen, hohen Hydratstufen der Salze am Tage Teile ihres Kristallwassers unter Volumenschwund abgeben, dieses Wasser in der Nacht wieder aufnehmen und durch die damit verbundene Volumenzunahme Drucke auf das Mineralgefüge der Gesteine ausüben.

- Bei ausreichend hoher Luftfeuchtigkeit entstehen durch Aufnahme von Wassermolekülen aus der Luft an Stellen hoher Salzkonzentration gesättigte Salzlösungen. Außerdem kann bei steigender Temperatur die hohe Hydratstufe eines Salzes instabil werden, das Kristallwasser wird abgegeben und steht dann zur Bildung einer Salzlauge zur Verfügung.
Die entstehenden, hochkonzentrierten Porenwässer bieten eine weitaus höhere Löslichkeit für fremdionige Stoffe, als es bei verdünnten Lösungen der Fall ist. Sie können damit aggressiv lösend auf Gesteinsmineralien einwirken.
- Eine sehr auffällige Verwitterungserscheinung stellen die schwarzen Gipskrusten dar, die ganze Fassadenflächen überziehen können. Gewöhnlich wird für deren Entstehung der 'saure Regen' verantwortlich gemacht, die im Regenwasser enthaltene, weitgehend anthropogen erzeugte Schwefelsäure, die Carbonatmineralien zu Sulfatsalzen umwandelt. Vieles spricht jedoch dafür, daß die Gipsanreicherungen eher aus dem Zusammenwirken von adsorptiv angelagerten SO₂-Partikeln ("trockene SO₂-Deposition") und adsorbierter Luftfeuchtigkeit hervorgehen. Die Krustenbildung vollzieht sich z.B. gerade an den Stellen einer Fassade, die durch Regenwasser fast nie erreicht werden. Und während Regenfälle nur episodisch und in München mit meist nur geringen Schwefelsäuregehalten auftreten, kann sich die Aufnahme und Umsetzung von Schadstoffen und Feuchtigkeit aus der Luft zu jeder Zeit und an allen Bauteilen vollziehen. (Vgl. auch RÖNICKE & RÖNICKE 1972; KRAUS 1985).
- Bei der Verdunstung setzen Verkrustungen und Anstriche auf der Gesteinsoberfläche der Wasserdampfbewegung aus dem Inneren des Steins nach außen hin einen Widerstand entgegen, dessen Größe im Falle von Ölfarbenanstrichen wohl bis zur Dampfsperre reichen kann. Wird durch äußere Erwärmung die Verdunstung des Porenwassers erzwingen, werden Dampfdruckkräfte wirksam. Eine Wassermenge von 1 cm³ nimmt in gasförmigem Zustand ein Volumen von bis zu 1,6 l ein. Am Siedepunkt herrschen Druckkräfte von max. 0,103 MN/m² (1 atm). Im Normalfall bleiben die bei der Verdunstung entstehenden Dampfdrucke minimal und unwirksam. Liegt jedoch eine Oberflächenverdichtung vor, so kann der Wasserdampfdruck durchaus zu Aufblähungen und kleineren Aufplatzungen der äußeren Schicht führen. Der fortwährende Nachschub von Feuchtigkeit kann durch Kapillarkräfte von unten oder von seitlichen Fugen her erfolgen. Während bei natürlich belassenen, frischen Werksteinen die gesamte Außenfläche für die Verdunstung zur Verfügung steht, reduziert sich die Möglichkeit des Gasaustausches im Falle von Anstrichen etc. auf eine Anzahl von Schwachstellen. Die verdunstende Feuchtigkeit diffundiert bevorzugt über diese Stellen nach außen, der Feuchtenachschub wird dorthin gelenkt, und es kommt dort zur Konzentration und zum Ausblühen von Salzen.

5.5.2. Regenwasser

Das auf die Bauwerke auftreffende bzw. mit ihnen in Berührung kommende Regenwasser wirkt sich direkt oder indirekt, mittel- und unmittelbar auf die Verwitterung der Werksteine aus. Es ist Träger der festen, gasförmigen und gelösten Verwitterungsgagenzien (vgl. 5.6.) und bringt diese an die Gesteine heran. Das an einer Fassade ablaufende Niederschlagswasser spült mechanisch Gesteins- und Staubpartikel von den Bauteilen ab. Es durchnäßt die beregneten und überflossenen Flächen und stellt Feuchtigkeit bereit zur Versorgung der vielfältig ausgebildeten Kapillarwassersäule. Im Regenwasser lösen sich Gesteinssubstanz und leicht lösliche Salze aus den unterschiedlichsten Baustoffen auf, wandern Salz-Ionen durch Kapillarkräfte und Diffusion hin zu Verdunstungsbereichen, wo sie sich konzentrieren und als materialschädigende Ausblühungssalze kristallisieren. Weitere Effekte sind Dehnung und Quellen von Gesteinspartien durch Wasseraufnahme, Schrumpfung durch Wasserabgabe. Auch die Abwesenheit von Regenwasser ist bedeutsam: An nicht direkt beregneten und von Ablaufbahnen nicht erreichten Bauteilflächen kumulieren sich Staub und Salze, bilden und halten sich Gipsverkrustungen.

Die jährliche Niederschlagshöhe in München beträgt im Mittel knapp 1000 mm. Messungen des Deutschen Wetterdienstes, Wetteramt München, ergaben für den Zeitraum 1931-1960 970 mm Niederschlag pro Jahr; von 1951 bis 1980 errechnet sich ein Mittelwert von 947mm/Jahr. Die Hauptmenge des Niederschlags fällt in den Frühlings- und Sommermonaten (Abb. 17 und Tab. 23); im Winter besteht ein Teil des Niederschlags aus Schnee (vgl. Abb 13).

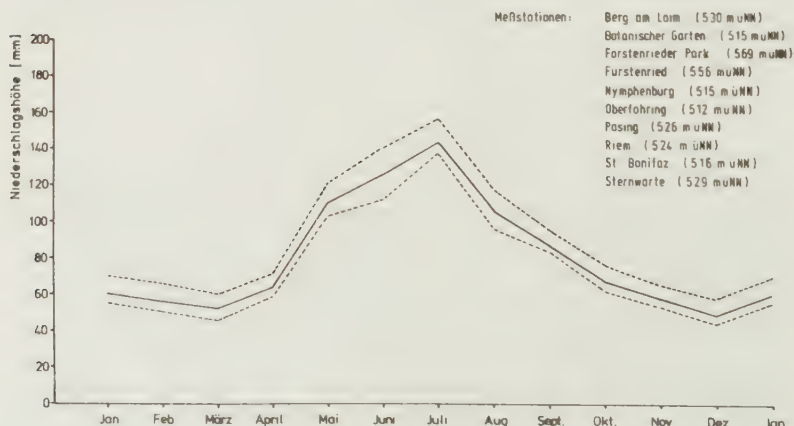


Abb. 17: Mittlere monatliche Niederschlagshöhen in München (1931-1960)
(Mittelwerte und Schwankungsbreite von 10 Münchner Meßstationen;
nach Daten des Deutschen Wetterdienstes, Wetteramt München)

Wie bereits in Abschnitt 5.4. ("Luft und Luftbewegung") dargelegt, herrschen bei rund 75 % der Niederschlagsereignisse Windströmungen aus westlichen Richtungen (vgl. Abb. 13). Nach den in Abb. 7 aufgezeichneten Jahresgängen für 1980 werden dabei rund 85 % der jährlichen Niederschlagsmenge aus Südwest, West und Nordwest herangeführt. Zudem erreichen westliche Windströmungen im Mittel die höchsten Windgeschwindigkeiten (vgl. Abb. 15). Die genannten Einflüsse haben zur Folge, daß schätzungsweise 80-90 % der in München fallenden Regenmengen den nach Nordwest, Südwest und vor allem den nach West orientierten Fassadenflächen und Steinteilen zugute kommt. Die nach Osten ausgerichteten Bauteile werden dagegen nur sporadisch und mit weit geringerer Intensität beregnet.

Beobachtungen während und nach Regenfällen zeigen, daß der Regen eine gewisse Intensität besitzen muß, um überhaupt eine sichtbare Vernässung freier und vertikal stehender Fassadenflächen bewirken zu können. Die Feuchtigkeit eines nur leichten Regens, der gleichwohl von Dauer sein kann, verdunstet augenscheinlich innerhalb kurzer Zeit nach dem Auftreffen der Tropfen auf der Bauteiloberfläche wieder. Auf horizontalen Flächen sammelt sich allerdings auch dann Stauwasser an, das Kapillarsaumbereiche mit Feuchtigkeit versorgen kann. Nach starken Regenfällen und bei anhaltend trübem Wetter trocknen die Steinteile innerhalb von 1 bis 2 Tagen vollständig ab. Letzte Reste von Feuchtigkeit halten sich als dunkle Flecken in grob porösen und lückigen Lagen von Sedimentgesteinen, als Wasserpolster (Stauwasser) auf horizontalen Bauteilflächen oder im Bodenbereich vor der Fassade.

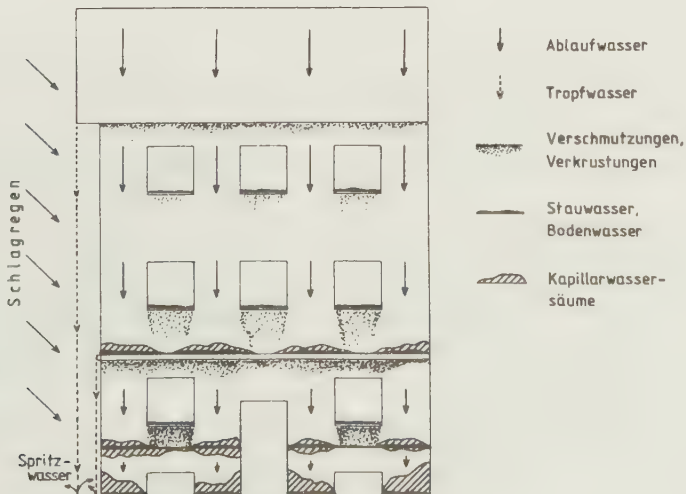


Abb. 18: Verschiedene 'Spezies' von Niederschlagswasser an einer Gebäudefassade

Das Niederschlagswasser erfährt im Zusammenspiel von Schwerkraft und Fassadengestaltung und modifiziert durch das Wasserangebot, die Höhe der Verdunstung und die Beschaffenheit der beregneten Baustoffe eine Aufspaltung in mehrere, unterschiedlich wirksame Wasser'spezies'. Zu unterscheiden sind:

- Schlagregen
- Ablaufwasser
- Stauwasser und Bodenwasser
- Sickerwasser
- Winddruckwasser
- Kapillar aufgenommenes Wasser
- Tropfwasser
- Spritzwasser

(Die genannten Begriffe finden sich teils in einschlägiger Literatur verwendet, teils werden sie für die Belange dieser Arbeit neu definiert.)

Im folgenden werden die Erscheinungs- und Wirkungsweisen dieser Wasserspezies am Gebäude im einzelnen dargestellt. Dabei wird zur Vereinfachung der Ausführungen lediglich auf die Verhältnisse an Gebäudefassaden eingegangen; sie sind aber ohne weiteres übertragbar auf einzeln stehende Denkmäler, Verkleidungen von Unterführungen, Bodenbeläge o.ä. In Abb. 18 sind am Beispiel einer beliebigen Gebäudefassade die wichtigsten Erscheinungsweisen des Niederschlagswassers veranschaulicht.

Es muß darauf hingewiesen werden, daß die beschriebenen Beobachtungen die Verhältnisse in München wiedergeben; an anderen Orten herrschen andere Niederschlags- und Windverhältnisse, kann das Verhältnis zwischen Verschmutzung und Abwaschung so verschoben sein, daß selbst an direkt beregneten Bereichen keine nennenswerte Säuberung stattfindet.

5.5.2.1. Schlagregen

Die im vorhergehenden für München angegebenen Niederschlagshöhen sind meßtechnisch als die auf eine horizontale Fläche fallende Wassermenge pro Zeiteinheit definiert. Gebäudefassaden stellen allerdings weitgehend vertikale Flächen dar, die von lotrecht fallenden Wassertropfen kaum erreicht werden. Hier muß der Begriff des "Schlagregens" eingeführt werden, d.h. die unter Windwirkung auf vertikale Flächen auftreffende Komponente des Niederschlags.

Mit dem Phänomen des Schlagregens befaßten sich u.a. SCHWARZ & FRANK (1973), deren in Holzkirchen, am Institut für Bauphysik der Fraunhofer-Gesellschaft gewonnene Meßergebnisse sich gut auf die Münchner Verhältnisse übertragen lassen.

Bereits ab relativ geringen Windgeschwindigkeiten von etwa 5 m/s ("schwache Brise") übersteigt die Schlagregenmenge die gleichzeitig lotrecht herabfallende "Normalregenmenge". Abb. 19 zeigt am Beispiel eines Regensfalls in Holzkirchen die Niederschlagsintensitäten auf eine Horizontalfläche (Normalregen) und auf eine Vertikalfläche (Schlagregen).

Eine einfache, durch Bezugsmessungen bestätigte Beziehung zwischen der Schlagregenmenge, der Normalregenmenge und der Windgeschwindigkeit gibt LACY (1965):

$$R_S = a \cdot V_W \cdot R_N \quad (\text{mm/h}) \quad \text{mit: } R_S: \text{ Schlagregenmenge (mm/h)}$$

V_W : Windgeschwindigkeit (m/s)
(über die Dauer des Niederschlags gemittelt)

R_N : Normalregenmenge (mm/h)

a : Proportionalitätsfaktor = 0,2 (s/m)

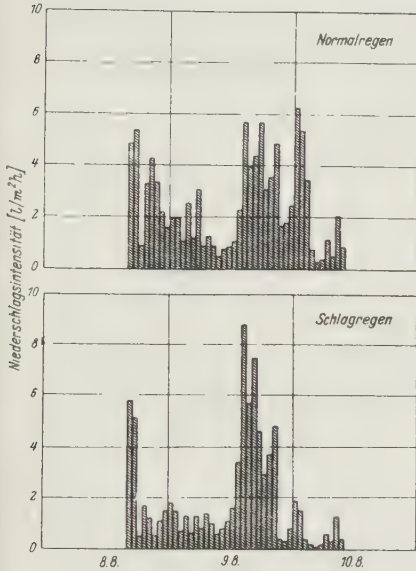


Abb. 19:

Niederschlagsintensitäten (pro Stunde) für Normalregen und Schlagregen während einer Periode intensiver Niederschläge

(aus SCHWARZ & FRANK 1973)

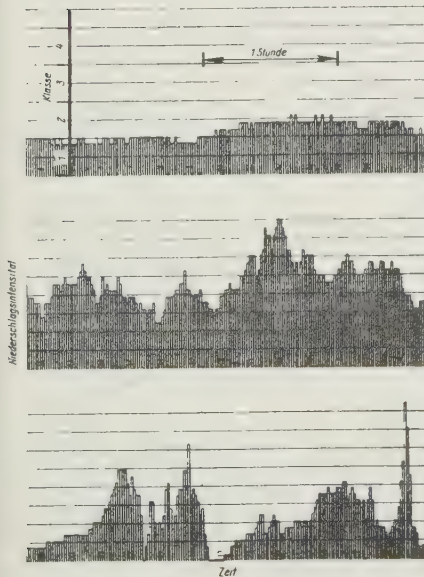


Abb. 20:

Beispiele für Zeitverläufe der Niederschlagsintensität (Schlagregen).

Jede Säule repräsentiert die Niederschlagsintensität während einer Minute.

Oben: Gleichmäßiger, geringer Schlagregen.

Mitte: Stärkerer Regen mit üblichen Schwankungen der Intensität.

Unten: Typischer Schauerregen bei böigem Wind.

(Eine Intensitätsklasse entspricht $2 \text{ l/m}^2\text{h}$ oder 2 mm/h .)

(aus SCHWARZ & FRANK 1973)

SCHWARZ & FRANK (1973) konnten mit ihren Versuchsanordnungen nicht nur Aussagen zur Menge des Schlagregens machen, sondern auch zu dessen "Feinstruktur", die sich als Funktion der Schlagregenmenge von der Böigkeit des Windes über die Zeit hinweg ergibt. In Abb. 20 sind solche Beispiele für Zeitverläufe der Schlagregenintensität aufgezeichnet.

Messungen von LACY (1965) in Großbritannien zeigten, daß gleichzeitig mit der Windstärke auch die Schlagregenbeanspruchung vom Stadtrand zum Stadtinneren hin erheblich abnimmt. Aus dem gleichen Grund ist die Intensität des Schlagregens an höher gelegenen Bauteilen um ein Vielfaches größer als im Erdschoßbereich. Schließlich trifft auf die Randzonen von Fassaden weit mehr Niederschlag als auf die Wandmitten, was durch die Herausbildung eines Windpolsters durch Luftstau vor der Gebäudefront zu erklären ist.

Bildet sich auf der Oberfläche einer Fassade durch Schlagregen ein geschlossener Wasserfilm, so dringt ein Teil der Feuchtigkeit direkt in die berechneten Baustoffe ein, getrieben durch die kinetische Energie der Regentropfen, durch die Schwerkraft, durch Kapillarkräfte und durch die Windkräfte, welche das Wasser in Poren, Risse, Fugen und Öffnungen pressen (vgl. 5.5.2.5.).

5.5.2.2. Ablaufwasser

Der größte Teil einer stärkeren Niederschlagsmenge, die auf ein Gebäude trifft, fließt über die Fassade, aber auch über die Dachflächen, die Regenrinnen und Regenrohre ab. Das an der Fassade herablaufende, hier "Ablaufwasser" genannte Regenwasser spült die Wandoberflächen von Verschmutzungen, ausgeblühten Salzen und locker gewitterten Teilchen frei, die sich während der vorangegangenen Trockenperiode dort festgesetzt und gebildet haben (vgl. RÖNICKÉ & RÖNICKÉ 1972). Die Lösungs- und Abtragungsvorgänge führen einerseits zu äußerlicher Säuberung der Fassadenflächen, andererseits aber, und besonders bei carbonathaltigen Gesteinen, zur Aufräumung und zur allmählichen Rückwitterung der Bauteiloberflächen.

Infolge der in München vorherrschenden Westwindrichtungen betrifft die Abspülung und Rauwitterung bevorzugt die Westseiten der Gebäude, etwas abgeschwächt auch die nord- und südexponierten Flächen, während sich auf den Ostseiten lediglich örtlich begrenzte Ablaufbahnen in Abhängigkeit von der Dach- und Fassadenkonstruktion ausbilden.

Nur bei gänzlich ungegliederten Fassadenflächen ist zu erwarten, daß die Schlagregenmenge gleichmäßig flächig über die gesamte Gebäudefront herunter abfließt. Tatsächlich bilden sich aber auch in solchen Fällen bereits bei den ersten Regenereignissen bevorzugte Fließbahnen aus, die in der Folgezeit immer wieder benutzt und dadurch dauerhaft eingepreßt werden. Auf die Mitten der Bahnen konzentriert sich die Materialablösung, durch welche die Bahnen vertieft werden, randlich reichern sich Schmutzteilen, die nicht abgewaschen bzw. vom ablaufenden Wasser selbst dort abgelagert werden, zu Verkrustungen an. Schrägscharrierte Werksteinoberflächen lenken das Ablaufwasser in Richtung der Riefen, wobei sich interessante Farbspiele entwickeln können.

Trifft Ablaufwasser auf vorkragende Bauteile, so sammelt es sich auf deren Oberseiten zu einem Wasserpolster, dem "Stauwasser" (s.u.) an. Ein Teil des überschüssigen Stauwassers fließt, sofern die Möglichkeit dazu besteht, seitlich am Hindernis herunter. Es bilden sich anfangs enge, nach unten sich trichterförmig öffnende Bahnen heraus, die oft prägnante Übergänge zeigen vom eigentlichen Ablaufbereich, über wulstartig erhöhte, durch Gipsabscheidung verkrustete Schmutzablagerungen (Abspülungen der Staubablagerung auf der horizontalen Stau-

fläche) hin zur normal verschmutzten Fassade. Ein anderer Teil des Stauwassers verläßt das Hindernis über die Vorderkante, teils als 'Tropfwasser' (s.u.), teils in Form von schmalen Ablaufbahnen. Durchlaufende Gesimse können das Ablaufwasser fast vollständig vom weiteren Weg nach unten absperren.

Bei Starkregen fallen oft hohe Abflußmengen aus überlasteten Regenableitungsrohren an, so daß das Wasser in kräftigem Schwall aus den Verbindungsstücken der Fallrohre schießt und für eine intensive Abwitterung der überspülten Bereiche sorgt.

Sowohl das Angebot, als auch die Spülkraft des Ablaufwassers sind in den oberen Fassadenbereichen am höchsten und verlieren sich nach unten hin mehr und mehr. Direkt unterhalb von vorkragenden Teilen bleiben Verschmutzungen oft ganz vor Abspülung bewahrt und verkrusten allmählich durch Gipsausscheidungen, wie es sonst für die Ostseiten der Gebäude typisch ist.

5.5.2.3. Stauwasser und Bodenwasser

Stauwasser bildet sich auf Überständen der Fassade (Gebäudeabsätze, Gesimse, Sockeloberkanten, Fenster- und Türstürze, Fensterbänke, Balkone, Konsolen, Zierteile, Werbetafeln, Rolladenkästen etc.), aber auch in offenen Horizontalfugen zwischen Fassadenplatten, also überall dort, wo sich bei Regenfällen das Ablaufwasser zu einem Wasserpolster aufstauen kann. Ein Großteil dieses Stauwassers fließt - wie oben bereits erwähnt - seitlich oder über die Kante des Hindernisses hinweg ab; ein kleinerer Teil kann möglicherweise als 'Sickerwasser' (s.u.) ein betroffenes Bauteil durchtränken.

Stauwasser ist auch dasjenige Regenwasser zu nennen, das sich auf den Oberseiten von isoliert und freistehenden Bauteilen (Balkonbrüstungen, Zierteile, Zaunpfosten etc.), auf Treppenstufen, nicht überdachten Bodenbelägen und auf dem Gehsteig vor der Fassade ansammelt. Das hier so genannte "Bodenwasser" stellt sich im Sandbett unter den Gehsteigplatten ein.

Wichtig sind die Stau- und Bodenwasservorkommen vor allem für die Versorgung von Kapillarwassersäumen. Das aufgestaute Wasser stellt ein während und noch eine gewisse Zeit nach einem Niederschlagsereignis gleichmäßig vorhaltendes Reservoir für den kapillaren Wassereinzug in die benetzten Baustoffe dar. Entsprechend finden sich von fast allen Stauwasservorkommen ausgehend Kapillaarsaubereiche ausgebildet. Während die kapillaren Säume an höheren Teilen der Fassade oft unscheinbar und für die weitere Verwitterung meist folgenlos bleiben, kommt ihnen an den unteren Gebäudebereichen und besonders am Sockel eine große Bedeutung für die Salzverwitterung der Gesteine zu. Dies hängt einerseits mit dem reichhaltigen Angebot an Kapillarwasser im Gehsteigbereich zusammen, andererseits und vor allem mit den auf Straßenniveau besonders hohen Konzentrationen an löslichen und bauschädlichen Stoffen.

5.5.2.4. Sickerwasser

Als 'Sickerwasser' wird Regen- und Schneeschmelzwasser verstanden, das durch Schwerkrafteinfluß in die Poren- und Hohlräume der Werksteine eindringt. Von Sickerwasser betroffen sein können wiederum alle vorkragenden Bauteile von Fassaden, aber natürlich auch die Werksteine von Bodenbelägen und Treppenstufen.

Da die Stauwasser- und Schmelzwassermengen, und damit die wirksame Gewichtskraft des Wassers, normalerweise gering sind und beim Eindringen des Wassers in enge Porenräume Reibungskräfte zu überwinden sind, ist ein Einsickern von Wasser durch die Schwerkraft erst in Gesteinshohlräume von über 0,5 mm Öff-

nungsweite anzunehmen. Sickerwasser wird vornehmlich in Risse von Gesteinen, in Fugenspalten und lockere Mörtelmassen eindringen, von wo aus es Kapillarfeuchtigkeit an die Werksteine abgibt oder an der Unterseite von Gesimsen, Balkonen u.ä. als 'Tropfwasser' (s.u.) wieder in Erscheinung tritt.

5.5.2.5. Winddruckwasser

Windkräfte sorgen nicht nur für die Entstehung des Schlagregens und damit für die äußere Benetzung der Gebäudefassaden durch das Niederschlagswasser; sie können zusätzlich das Wasser in die Hohlräume der Gesteine und die Fugenzone der Fassadenbekleidungen einpressen.

Manche Autoren sprechen von einem durch Winddruck verursachten, völligen Durchdringen von Mauerwerksteilen mit Regennässe. SNETHLAGE (1984) glaubt dagegen, gestützt auf Berechnungen von KLOPPER (1979), nicht an ein tieferes und rascheres Eindringen von Feuchtigkeit durch Winddruck in unbeschädigte und normal poröse Werksteine, als es durch die Kapillarkräfte möglich ist, da die herrschenden Windgeschwindigkeiten und Staudrucke hierfür zu niedrig sind. Eine entscheidende Steigerung der Eindringtiefe ist nach KLOPPER (1979) bei Porenradien von $1\text{ }\mu\text{m}$ erst ab einem äußeren Druck von 10 N/mm^2 zu erwarten. Sehr hohe Winddrucke in München erreichen eine Staudruckkraft um 10^{-3} N/mm^2 (vgl. 5.4.).

Wesentlich wirkungsvoller ist das Eindringen von Niederschlagswasser in die offenen Fugen zwischen Werksteinplatten, in lockere und schadhafte Mörtelmassen sowie durch Risse und Brüche hindurch. Hierbei wird das Wasser u.U. tief in das Mauerwerk und auf die Rückseiten von Plattenverkleidungen gepreßt, wo es, vor der Verdunstung weitgehend geschützt, Gesteinsteile lange Zeit feucht halten, Salze aktivieren und Lösungsvorgänge unterstützen kann.

5.5.2.6. Kapillarwasser

Wie alle porösen Baustoffe besitzen Gesteine die Fähigkeit, durch Kapillarkräfte Wasser in ihren Porenraum aufzunehmen. Überall dort, wo Niederschlagswasser mit den unbehandelten Oberflächen von Werksteinen in direkten Kontakt kommt, beginnt die Kapillare Wasseraufnahme, die je nach Umständen mehr oder weniger intensiv verlaufen und geringe bis gravierende Schädigungen zur Folge haben kann.

Bei freien Fassadenflächen, an denen das Niederschlagswasser ungehindert abfließt, besteht nur während und für eine gewisse Zeit nach einem Regenfall Kontakt zwischen Schlagregen bzw. Ablaufwasser und Gestein. Das dabei kapillar aufgenommene Wasser verursacht eine meist wenig tiefreichende Durchfeuchtung der äußeren Gesteinspartien, die bei der nachfolgenden Verdunstung rasch wieder verflegt. Unstetigkeiten innerhalb der Fassadenfläche oder im Bereich einzelner Werkstücke können allerdings bewirken, daß Schlagregen, Ablauf-, Sicker- und Winddruckwasser auch tiefer in das Mauerwerksgefüge eindringen. So nehmen offene oder mit Mortel gefüllte Fugenspalten, Dübelbohrungen, größere Gesteinshohlräume, Risse, locker gewitterte Gesteinspartien etc. unmittelbar Niederschlagswasser auf; es bilden sich zusätzliche Kontaktflächen zwischen Wasser und Gestein, von denen aus sich die kapillare Durchfeuchtung weiter ausbreiten kann.

Als Folgen bloßer Durchfeuchtung mögen Quellungen, Dehnungen und Schrumpfungen, langsames Herauslösen von Gesteinssubstanz, Bindung von Schmutzteilen, Ansiedlung von Organismen, Beeinflussungen der Wärmeleitfähigkeit u.a.m. anzusehen sein. Frostverwitterung entfaltet m.E. nur in besonderen Fällen gefügestörende Wirksamkeit (s.u.).

In der Zeit der kapillaren Durchnässung vermögen sich im Porenwasser Salze und Gesteinssubstanz aufzulösen. Die in Lösung genommenen Stoffmengen werden bei der Verdunstung zur Gesteinsoberfläche hin transportiert, dort ausgefällt und vom nächsten Ablaufwasser abgewaschen. Der beim einzelnen Niederschlagsereignis geringe Substanzverlust führt im Lauf der Zeit bei den carbonathaltigen Materialien zur allmählichen Rohwitterung. Die stärksten Abwitterungsraten ergeben sich im Bereich der Ablaufbahnen selbst, da die dort konzentrierten Wassermengen eine stärkere kapillare Durchfeuchtung und zugleich einen intensiveren mechanischen Abtrag erwirken.

Die auffälligsten Kapillarwasserbereiche an Gebäudefassaden - die Kapillarwassersäume - stehen in Verbindung mit den das Ablaufwasser sammelnden Stauwasserlagen auf horizontalen Bauteilflächen und mit den Stau- und Bodenwasservorkommen auf den Trottoirs. Die Kapillarsäume entwickeln sich dabei nicht nur von der Wasserquelle her nach oben, sondern natürlich auch nach unten oder, von Fugen ausgehend, zur Seite hin. Zuweilen verstärken sich durch Überschneidung aufsteigender und absteigender Saum. Durch die Schmutzablagerungen auf den Horizontalf Flächen ist allerdings häufig eine gewisse Versiegelung gegeben, so daß absteigende Säume in der Regel mit geringerer Häufigkeit und Intensität auftreten.

Die von den Stauwasserlagen ausgehenden kapillaren Feuchtesäume wirken als "Salzpumpen", durch welche leicht lösliche Komponenten aus dem Straßenstaub, aus Regen- und Schneeschmelzwasser, aber auch aus der Gesteinssubstanz und aus Baustoffen durch den Porenraum der Gesteine hindurchtransportiert und im Verdunstungsbereich an der Werksteinoberfläche abgelagert werden. Das verdunstende Wasser verläßt als reines Lösungsmittel den Stein, zurück bleiben zunächst eine hochkonzentrierte Salzlösung und beim völligen Austrocknen die auskristallisierten Ausblühungssalze. Ein Teil dieser Salze wird durch Wind und Regen wieder abgetragen - insgesamt reichern sich bei nicht völlig unterbrochenem Salznachschub die Salzgehalte in den Verdunstungszonen der kapillaren Säume aber mehr und mehr an. Durch aggressive Lösung und mechanische Druckwirkungen entwickeln sich hier stärkste Gesteinsschäden.

Sind in einem Gestein erst einmal Salze etabliert, so sorgen diese durch ihre hygroskopischen Eigenschaften dafür, daß sich der Reibungswiderstand, den das Wasser beim Eindringen in die Kapillaren zu überwinden hat, entscheidend reduziert. Ein erneuter Kapillarwasseranstieg erfolgt dann erheblich rascher, als es im trockenen und salzfreien Gestein möglich wäre. Beobachtungen unter dem Makroskop zeigen, daß Wassertropfen beim Kontakt mit verwittertem, salzhaltigem Gesteinsmaterial überaus heftig reagieren; sie schießen regelrecht in die versalzten Bereiche hinein. Bei salzfreien Proben bilden sich Tropfenpolster aus, ohne daß eine Benetzung der Mineralkörner angestrebt wird.

Mit grundsätzlichen Fragen über die kapillare Flüssigkeitsbewegung in Baustoffen beschäftigen sich neben vielen anderen Autoren eingehend: SOMMER (1971); KLOPFER (1979); SNETHLAGE (1984).

5.5.2.7. Tropfwasser

Bei stärkeren Regenfällen reicht die Kapazität der Regenrinnen oft nicht aus, das auf den Dachflächen gesammelte Wasser vollständig abzuleiten. Überschüssiges Wasser fällt dann als 'Tropfwasser' von den Dachrändern aus großer Höhe herab. Tropfwasser kann außerdem an allen anderen überstehenden Teilen einer Fassade entstehen, an Gesimsen, Balkonen, Fensterbrettern, Installationen etc.

Das auf den Gehsteig auftreffende Tropfwasser kann zu 'Spritzwasser' (s.u.) werden, das die Sockelbereiche der Gebäude zusätzlich durchnäßt.

Bestehen Teile der Fassaden- und Dachkonstruktionen aus Eisen- oder Kupferblech, so hinterläßt das auf den Gehsteig, auf Treppenstufen oder Sockeloberkanten auftreffende Tropfwasser dauerhafte, rostbraune bzw. kupferpatinagrüne Verfärbungen.

Besondere Tropfwassererscheinungen finden sich auf den Unterseiten von Balkonen und anderen, weit vorkragenden Bauteilen. Hier kann das Regen- bzw. Schneeschmelzwasser durch die Bauteile und Bauteilfugen auf die Unterseite gelangen, von wo es schließlich abtropft und dabei Kalk-, Gips- und Salzkrusten hinterläßt; an der Aufschlagstelle entwickeln sich manchmal dicke, bläulich-grau, rostbraun oder kupfergrün gefärbte Kalkkrustenpolster.

5.5.2.8. Spritzwasser

Beim Auftreffen auf den regennassen Gehsteig verursacht das vor der Fassade herabfallende Tropfwasser häufig 'Spritzwasser', das die Sockelbereiche der Gebäude bis zu Höhen von etwa 1 m von außen her vernäßt. Die nässende und abwaschende Wirkung tritt bei jedem ergiebigeren Regenfall an denselben Steinteilen auf. Es bilden sich oft über ganze Bauwerkslängen hinweg saubere, fahl gebleichte, aber kaum rau gewitterte, nach oben hin meist deutlich abgesetzte Spritzwasserbereiche aus.

Die Wirkung des Autoverkehrs, durch den Regenwasser aus Pfützen an manche Stellen von Gebäudefassaden gespritzt wird, ist auf wenige und lokal begrenzte Situationen beschränkt.

5.5.3. Grundfeuchte

In früheren Zeiten stellten Mauerschäden durch aufsteigende Grundfeuchte ein ernstes Problem nicht nur für die verbauten Naturwerksteine, sondern für ganze Gebäude dar. Die Nässe stammte entweder aus dem Sickerwasser oder aus dem Kapillarsaum des Grundwassers oder aus dem Grundwasser selbst. Sie stieg kapillar im Mauerwerk auf und verdunstete am Kontakt der Baustoffe mit der Atmosphäre. Bevor im 19. Jahrhundert damit begonnen wurde, die Viertel der Münchner Altstadt mit einer Kanalisation zu versehen, kamen mit den in den Boden eindringenden Niederschlägen und den meist ungefaßt versickernden häuslichen und gewerblichen Abwässern großen Mengen an Feuchtigkeit und leicht löslichen Stoffen mit den Gebäudemauern in Berührung. In den oberen Bereichen der Kapillarsäume reicherten sich Salze an, die materialzerstörend wirken begannen. Hoch steigende Feuchtesäume an einzelnen alten Gebäuden erinnern noch an diese Verhältnisse. Die ständig durchfeuchteten Mauern stellten im Inneren der Gebäude einen guten Nährboden für Algen- und Pilzbewuchs dar.

Moderne Gebäude werden durch Drainagen, Isolierungen und Schutzanstriche von Beginn an vor dem Eindringen von Grundfeuchte geschützt. Alte Gebäude können durch Einziehen wassersperrender Schichten bis zu einem gewissen Grade saniert werden. Die einmal im Mauerwerk angereicherten Salze wirken allerdings hygroskopisch, so daß betroffene Fassadenteile selbst bei inzwischen unterbrochenem Wassernachschub auch weiterhin durchfeuchtet erscheinen und sich Salzaktivitäten entfalten können.

Infolge der Kanalisierung der Abwässer und eines Großteiles der Niederschläge und auch aufgrund der allgemeinen Absenkung des Münchner Grundwasserspiegels

seit Mitte des letzten Jahrhunderts kommen die allermeisten Gebäude heute mit dem Grund- und Sickerwasser nicht mehr in direkte Berührung. Heutige Kapillarwasserschäden in den Sockelbereichen entwickeln sich fast ausschließlich durch das vom Gehsteig aufgenommene Niederschlagswasser.

5.5.4. Schnee und Eis

Im Winter fällt ein Teil des Niederschlags in Form von Schnee. Von den im Durchschnitt etwa 200 Tagen eines Jahres mit Niederschlägen herrscht an 50 Tagen Schneefall, an etwa 60 Tagen eines Jahres ist eine Schneedecke im Stadtgebiet vorhanden.

Bei Temperaturen von unter 0 °C kann sich Niederschlagsfeuchtigkeit zu Eis umbilden. Diese Möglichkeit zur Eisbildung ist in München an den Mittel etwa 120 Frosttagen eines Jahres gegeben. Dauerfrost herrscht an den etwa 30 Eistagen mit einem Temperaturmaximum unter 0 °C. Mit Frosttagen ist von Oktober bis einschließlich Mai, mit Eistagen von November bis März zu rechnen. Absolut tiefste Lufttemperaturen wurden in München in den letzten 100 Jahren mit Werten knapp unter -30 °C erreicht. (Vgl. Abschnitt 5.3.1.; Abb. 7 und 10; Tab. 20, 21, 22 und 23).

Aufgrund der meteorologischen Gegebenheiten und aufgrund der enormen Druckkräfte, die gefrierendes Wasser auf seine Umgebung ausüben kann - die mögliche Druckkraft nimmt von 0 (bei 0 °C) über 61 (bei -5 °C) auf maximal 211,5 MN/m² (bei -22 °C) zu -, wird der Frostverwitterung in Literatur und Praxis große Bedeutung beigemessen (HIRSCHWALD 1912; KIESLINGER 1932; FITZNER 1970). Im Kontrast dazu steht die Beobachtung, daß eindeutige Frostverwitterungsschäden an der Gesamtzahl der Verwitterungserscheinungen - zumindest in München - verschwindend geringen Anteil einnehmen.

Damit Gefrierschäden in Gesteinen tatsächlich eintreten können, müssen bestimmte Voraussetzungen erfüllt sein:

- a) Das Gesteinsgefüge muß derart beschaffen sein, daß das im Porenraum gefrierende Wasser die zur Sprengung erforderlichen hohen Drucke aufbauen kann. Dies ist nicht bei allen Gesteinen der Fall.

Lange Zeit galt der Sättigungswert ("S-Wert" = Quotient aus der Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck und der Wasseraufnahme unter einem Druck von 150 bar; ermittelt nach DIN 52 103 und DIN 52 113) als entscheidendes Kriterium für die Frostempfindlichkeit eines Gesteins. NIESEL & SCHIMMELWITZ (1982) sowie SNETHLAGE (1984) weisen neuerdings auf die Bedeutung der Porenradienverteilung hin, bei der Mikro- bzw. Mesoporen und Makroporen in einem bestimmten Mengenverhältnis zueinander stehen müssen, um Sprengdrucke durch gefrierendes Porenwasser entstehen zu lassen.

- b) Der Porenraum des betroffenen Werkstückbereiches muß bei Eintritt und während des Frostes annähernd wassergesättigt sein.

Die allermeisten Werkstücke an Gebäuden befinden sich in trockenem Zustand bzw. im Zustand der Gleichgewichtsfeuchte (vgl. 5.5.1.). Die periodischen, nur stunden- oder tageweise anhaltenden Regenwasservernässungen reichen nicht aus, die feinen Porenräume, auf die es bei der Frostsprengung ankommt, mit Wasser zu sättigen.

Anders verhält es sich in Bereichen von dauernd aufsteigender Grundfeuchte, an Mauern, die mit Erdreich hinterfüllt sind und in ständigem Kontakt zu Sickerwasser stehen, an Bodenbelägen, die durch Boden- und Schneeschmelzwasser nachhaltig benetzt werden sowie an Ge-

steinen von Brunnenfassungen. In all diesen Fällen ist eine länger dauernde kapillare Durchfeuchtung möglich, die zu hohen Sättigungswerten führen kann bzw. die ein nachhaltiges Austrocknen der naturfeucht verbauten Gesteine überhaupt verhindert.

- c) Das im Porenraum der Gesteine befindliche Wasser muß tatsächlich zu Eis gefrieren.

Kapillarspannungen, der Widerstand der Porenwandungen gegen die Eisbildung und im Porenwasser gelöste Stoffe setzen den Gefrierpunkt des Porenwassers um einige Grade herab.

Zur Bildung von Eis im Gesteinsinneren genügt es also nicht, daß die Lufttemperatur kurzfristig auf 0 °C absinkt. Es müssen die Temperaturen des Baustoffes und des Porenwassers deutlich unter 0 °C erniedrigt sein, was entsprechend tiefe Lufttemperaturen bzw. eine länger andauernde Frostperiode voraussetzt.

Schnee lagert sich in Schichten auf Bodenbelägen und Treppenstufen, auf Denkmälern sowie auf den horizontalen und den schräg geneigten Flächen von Fassadengesteinen ab. Durch wiederholtes Teilschmelzen und Wiedergefrieren bilden sich unter einer vorhaltenden Schneedecke bald Eisschichten aus, die fest mit dem jeweiligen Gestein verbunden sind. Schneeschmelzwasser, das z.B. durch Insolationsbestrahlung an höher gelegenen Gebäudebereichen entsteht, kann nach kurzem Ablaufweg an beschatteten Lagen von vertikalen Bauteilflächen als mehr oder weniger dicke Eisschicht wieder erstarren oder sich an Überhängen zu Eiszapfen formen. Dickere Eispänzer bilden sich gelegentlich an Brunnenanlagen, die nicht rechtzeitig winterfest gemacht wurden oder, überquellend, an Regenfallrohren, die durch Gefrorenis verstopfen.

Verwitterungswirkungen durch auflagernde Eisschichten beschränken sich auf die weitere Lockerung sowie auf die gelegentliche Ablösung und Abtragung bereits locker gewitterter Teile von Gesteinsoberflächen. Von intakten Werksteinen schmilzt das Eis ab, ohne sichtbare Spuren zu hinterlassen. Für ein Eindringen des Eises von außen her in das Porengefüge hinein ergeben sich trotz des engen Kontaktes zwischen Eis und Gestein keine Hinweise.

Gravierende Gesteinsschäden entwickeln sich bei Erstarrung von Porenwasser im Inneren eines Werkstückes. Die Schadensbilder sind eindeutig: An Bodenbelägen treten scherbige, scharfkantige, leicht bogige und glattflächige Abplatzungen auf. Betroffen sind insbesondere dichte Carbonatgesteine, die beim Frosteintritt durch Niederschlagsfeuchtigkeit, Schmelzwasser oder ausgetretenes Leitungswasser (bei Brunnenanlagen) vollkommen durchnäßt waren. Außerdem kommen Durchsprengungen ganzer Quader im Sockelbereich vor, die anscheinend in noch bruchfeuchtem Zustand kurz vor der Frostperiode verbaut worden sind. Bei ihnen sind die sehr feinen Poren noch wassererfüllt, so daß eine zusätzliche kapillare Vernässung rasch zur vollständigen Wassersättigung führt und dadurch die Voraussetzung für die Entstehung von Gefrierschäden schafft. Diese Art der Frostschädigung war früher offenbar weit verbreitet und gefürchtet (KIESLINGER 1932); heute wird durch bessere Isolierungsmaßnahmen und das Verwenden relativ dünner Fassadenplatten, die rascher austrocknen als dicke Quader und oft frei vor der Fassade aufgehängt werden, das Entstehen solcher Schäden weitgehend verhindert.

Gravierender als die direkten Frostsprengschäden wirken sich die mittelbaren Folgen der kalten Jahreszeit auf die Gesteinsverwitterung aus: Bei winterlichen Straßenverhältnissen werden immer noch große Mengen von Streusalz auf Fahrbahnen, Gehwegen und Treppenanlagen ausgebracht, die das Schneeschmelzwasser zur Sole werden lassen, die auf dem Weg über die Kapillarsaumbereiche der Bodenbeläge und Sockelzonen aggressivste Steinschädigungen hervorruft.

5.6. Inhaltsstoffe in Wasser und Luft

5.6.1. Feststoffe

Aerosole, also Feststoffpartikel, welche über die Größe von Molekülen deutlich hinausgehen und durch den Wind verfrachtet werden können, sind in der Luft, und daraus aufgenommen im Niederschlagswasser, in großer Vielfalt enthalten. Einige Stoffe wirken physikalisch, andere über chemische Umsetzungen auf die Verwitterung der Werksteine ein; alle Partikel können sich auf einer Gesteinsoberfläche ablagern und zu deren "Verschmutzung" beitragen.

Der Gehalt an Feststoffen in der Luft und in den Niederschlägen wird gewöhnlich als Schwebstaubkonzentration in mg/m^3 und als Menge des Staubbiederschlags in g/m^2 pro Zeiteinheit angegeben. Die Messung des Schwebstaubs erfolgt durch Ansaugen eines zeitlich konstanten Luftstromes über ein Filter, auf dem sich die abscheidbaren Aerosole im Korngrößenbereich zwischen ca. 0,7 und $60 \mu\text{m}$ niederschlagen. Die Konzentration des Schwebstaubs wird entweder durch Wägung des Filterrückstandes oder durch die Abschwächung einer das Filter durchdringenden Meßstrahlung ermittelt. Die Höhe des Staubbiederschlags ergibt sich aus der Wägung des Abdampfrückstandes des über eine bestimmte Expositionszeit (meist 30 Tage) hinweg gesammelten atmosphärischen Niederschlages (Bergerhoff-Verfahren) (BLfU 1982). Meßwerte finden sich veröffentlicht in den "Lufthygienischen Monats-" und "Jahresberichten" des Bayerischen Landesamtes für Umweltschutz, das auch Bestimmungen der Schwermetallgehalte des Staubbiederschlags (Fe, Cd, Pb, Zn, Cr) durchführt.

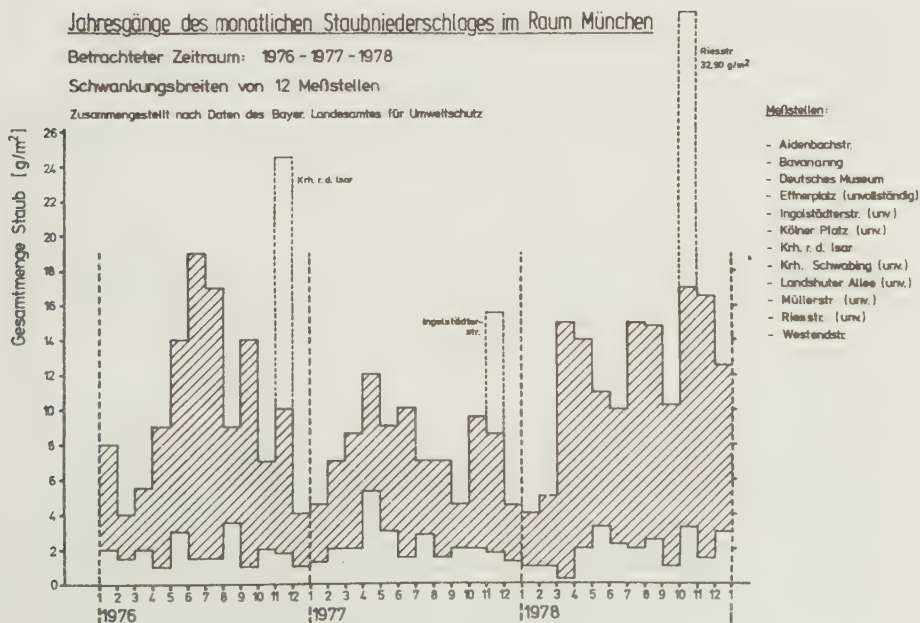


Abb. 21: Jahresgänge des monatlichen Staubbiederschlags in München (nach Daten des Bayerischen Landesamtes für Umweltschutz)

Abb. 21 gibt den Verlauf des monatlichen Staubniederschlags in München für die Jahre 1976 bis 1978 wieder. Der Staubniederschlag wird offenbar zu einem entscheidenden Teil durch den Regen-Niederschlag aus der Luft ausgewaschen: In den hohen Werten folgen die Jahresverläufe dem Gang der Niederschlagshöhe (vgl. Abb. 17). Anders verhält es sich mit dem Schwebstaub, bei dem die höchsten Konzentrationen während der winterlichen Heizperiode - analog zum Gang der SO_2 -Immissionen - auftreten (vgl. Abb. 7).

Die folgende Besprechung der auf die Werksteinverwitterung möglicherweise Einfluß nehmenden Substanzen im Luftstaub ist nach anorganischen und organischen Partikeln gegliedert. Grundsätzlich können alle Staubpartikel zur Verschmutzung der Gesteine beitragen.

Mineralische Substanzen

Silikatische Partikel

Abgewitterte Gesteinspartikel, wie besonders Quarzkörner und Glimmerblättchen, sowie aus Bau- und Zuschlagstoffen stammende Quarze und Ziegelstückchen finden sich fast in allen Schmutzbelägen auf Werksteinen. Silikatische Aerosole entstehen außerdem durch den Abrieb des Straßenbelages, und sie können aus dem städtischen Umland antransportiert werden. Gelegentlich kommt es in München zum Niederschlag von Quarzstaub aus der Sahara. Bei stärkeren Windgeschwindigkeiten können die Silikatpartikel abrasive Wirkung auf weichere Werksteine ausüben.

Carbonatische Partikel

Sie entstammen ebenfalls der Gesteinserosion, dem Straßenabrieb, windverblasenen Baustoffen, die während der Bauphase offen gelagert werden, sowie den umliegenden Ackerflächen, Wegen, Flußbetten, Kiesgruben. Die Carbonatpartikel können bereits in der Luft oder innerhalb der Schmutzschicht auf den Gesteinsoberflächen mit Schwefelsäure reagieren und zur Gipsentstehung beitragen. Die Reaktion in der Luft kann möglicherweise zu einer Neutralisierung des 'schwefelsauren Regens' führen (vgl. 5.6.3.1.). Die schädigende Wirkung des Schwefeldioxids ist damit aber nicht beseitigt, da die so entstandenen Gipspartikel sich im Niederschlagswasser lösen, in die Gesteine eindringen und dort die Salzkonzentrationen erhöhen können.

Lösliche Salze

Alle gesteins-schädlichen Salze wie Sulfate, Nitrate, Carbonate, Chloride, Phosphate können als Feststoffpartikel verblasen und auf Werksteinflächen abgelagert werden. Die Herkunft der Salze ist im einzelnen kaum zurückzuverfolgen; in Frage kommen Ausblasungen von Baustoffen, Streusalzen, Ausblühungssalzen und Düngemitteln, industrielle Emissionen und Neubildungen in der Luft (Gipsentstehung aus Carbonatpartikeln).

Schwermetalle

Bestimmte Schwermetalloxide, wie z.B. solche von Eisen, Blei oder Chrom, fördern auf katalytische Weise die Oxidation von SO_2 zum säurebildenden SO_3^{--} und SO_4^{--} in der Atmosphäre (vgl. NIESEL 1979). Sie tragen somit zur Umwandlung der SO_2 -Immissionen in die korrodierend wirkende Schwefelsäure bei. Schwermetalle gelangen bei industriellen und technischen Prozessen in die Luft, außerdem durch Korrosion und Erosion von metallischen Bau- und Werkstoffen. Eisenstaub, der besonders stark durch Korrosion und Abrasion von Straßenbahnschienen und -oberleitungen anfällt, führt zu nachhaltigen Verfärbungen von Werksteinoberflächen. Nach Meßdaten des Bayerischen Landesamtes für Umweltschutz betrug der Eisengehalt im Staubniederschlag 1976 und 1977 im Mittel 1,3 Gew.-% bei Schwankungen zwischen 0,2 und 4 %.

Organische Substanzen

ECKHARDT (1978) und ZEHNDER (1982) geben einen durch die Bestimmung des Glühverlustes festgestellten Gehalt an organischer Substanz und Ruß im Schwebstaub von ca. 50 Gew.-% an. KRAUS (1985) konnte in Straßenstaubablagerungen in Köln etwa 30 % organische Substanz nachweisen. Eigene Messungen an 7 Münchner Staubproben ergaben Anteile an glühbarer Substanz zwischen 11 und 31 Gew.-%.

Ruß

Ruß ist eine mineralische Substanz, die zu mehr als 95 % aus 'schlecht kristallisiertem' Kohlenstoff besteht. Er wird hier aufgrund seiner Entstehung aus der Verbrennung fossiler Kohlenwasserstoffe und seiner Bestimmung im Glühverlust zusammen mit den 'organischen Substanzen' abgehandelt.

Ruß bewirkt die Schwarzfärbung verschmutzter und verkrusteter Werksteinoberflächen; teils als dichter, fast reiner Rußbelag, teils als Einlagerung in die Kristalle der Gipskrusten. Nach ZEHNDER (1982) genügen nur wenige Prozent an Ruß, um Gipskrusten total schwarz zu färben.

Aufgrund seiner ausgezeichneten Adsorptions-Eigenschaften zieht Ruß eine große Menge verschiedenster Stoffe aus seiner Umgebung fest an sich. Besondere Bedeutung für die Gesteinsverwitterung muß der Anlagerung von SO₂-Molekülen und von Stickstoffverbindungen vor allem aus Autoabgasen beigemessen werden. Die feinen Rußschüppchen lagern sich mitsamt ihrem Adsorbat fest den Gesteinsoberflächen auf. Die adsorbierten Stoffe können vom Niederschlagswasser herausgelöst und in den Kapillarwasserbereichen zu Ausblüungssalzen angereichert werden.

Gummi- und Asphaltabrieb

Der Abrieb von Asphaltstraßendecken und Gummireifen durch den Autoverkehr liefert ebenfalls Staubpartikel organischer Zusammensetzung an die Luft. Sie tragen wohl lediglich zur Verschmutzung bei.

Während der 60er Jahre dieses Jahrhunderts waren in Folge der Spikes-Bereifungen der Kraftfahrzeuge besonders hohe Abtragungsraten an den Fahrbahndecken zu verzeichnen (PEFFEKOVEN 1969).

Teile von Pflanzen und Tieren

In Verschmutzungsbelägen von Werksteinen finden sich in unterschiedlicher Menge fast immer auch pflanzliche Fasern, Blütenstaub, Insektenteile, Bakterien u.a.m., die mit dem Luftstaub antransportiert werden. Die Organismen und Keime führen gegebenenfalls zur Ansiedlung von Bakterienkolonien, Moosen, Flechten und höheren Pflanzen bzw. dienen zu deren Ernährung.

Die im Makroskop erkennbare Zusammensetzung von Straßenstaub in München ist in Tabelle 28 am Beispiel von 4 Staubproben aufgezeigt. Aus den Staubproben wurden die darin befindlichen Salze in aqua dest. herausgelöst und naßchemisch analysiert (Tabelle 29).

Die Salzanteile (Salzgewicht im Verhältnis zum Gesamtgewicht der trockenen Probe) variieren zwischen 2 und 23 Gew.-%. Die Salze bestehen zu hohen Anteilen (bis zu 90 mval%) aus Calciumsulfat, immer ist wohl auch etwas Magnesiumsulfat vorhanden. Daneben kommt in allen Proben Natriumchlorid als Streusalzrückstand vor; in Probe ST 3 bis 10 mval%, in ST 4 sogar bis zu 30 mval%. Bemerkenswert sind die beträchtlichen Sulfatgehalte des lockeren Straßenstaubs in Hinsicht auf die Ausblüungssalze in den Kapillarsaumbereichen der Werksteinfassaden. Die sich dort anreichernden Sulfatsalze (vgl. 6.2.5.) lassen sich zwanglos aus dem Salzgehalt des Straßenstaubes herleiten.

Tab. 28: Staubproben aus der Münchner Innenstadt

ST 1 Alter Justizpalast - Nordfassade, Elisenstraße

Staub von der Oberkante des Granitsockels; darüber folgt die Fassadenmauerung aus Donaukalkstein.

Betrachtung im Makroskop:

Grundmasse aus feinem, sehr gleichkörnigem, grauem Staub. Darin eingelagert sind bis einige mm große Quarzkörner, Feldspäte, Glimmer und Carbonatpartikel.

ST 2 Alter Justizpalast - Nordfassade, Elisenstraße

Staub von der Oberseite eines Quaders der Fassadenmauerung aus Donaukalkstein am Haupteingangportal

Betrachtung im Makroskop:

In schwacher Vergrößerung: Fein- und gleichkörnige, graue Grundmasse; eingelagert sind einige mm- bis zu 0,5 cm-große Carbonatgesteinspartikel sowie Fasern unterschiedlicher Art.

In stärkerer Vergrößerung: Die Grundmasse setzt sich aus klaren, weißen, braunen, schwarzen und roten Partikeln zusammen. Im einzelnen sind zu erkennen:

- Carbonatkörner (hellgelb; gerundet)
- Quarze
- Glimmer
- Glasbruchstücke
- Ziegelteilchen
- schlackenartige, schwarze Teilchen
- schlackenartige, rostfarbene Teilchen
- opake Körner
- auskristallisierte Salze (vorwiegend Gipse)
- sehr viele Fasern (Kunstfasern; Plastikstückchen)

ST 3 Lenbachplatz 3 (Bernheimer Haus) - Ostfassade

Staub von der Oberseite eines Sockelquaders am Haupteingang aus Donaukalkstein.

Betrachtung im Makroskop:

Feiner Staub aus klaren, weißen, braunen, roten und schwarzen Partikeln. Dazu Fasern. Insgesamt leicht "fettige" Erscheinung.

ST 4 Lenbachplatz 5 - Ostfassade

Staub von der Oberseite eines Sockelquaders aus Granit; darüber folgt die Fassadenmauerung aus Sandstein.

Betrachtung im Makroskop:

Feiner Staub aus klaren, weißen, braunen, roten und schwarzen Partikeln. Sehr viele Fasern und Haare.

	ST 1			ST 2			ST 3			ST 4		
	mg	mval	mval%	mg	mval	mval%	mg	mval	mval%	mg	mval	mval%
Ca ⁺⁺	76,2	3,80	89	831,7	41,50	84	305,6	15,25	83	35,1	1,75	58
Mg ⁺⁺	1,8	0,15	3	54,7	4,50	9	14,0	1,15	6	3,0	0,25	8
Na ⁺	4,5	0,20	5	65,0	2,83	6	40,0	1,74	9	20,0	0,87	29
K ⁺	1,1	0,03	1	24,0	0,61	1	8,0	0,20	1	3,0	0,08	3
NH ₄ ⁺	1,35	0,08	2	2,1	0,12	-	2,0	0,11	1	0,85	0,05	2
Fe ⁺⁺	0,04	-	-	0,2	0,01	-	0,5	0,02	-	0,05	-	-
HCO ₃ ⁻	15,3	0,25	6	122,0	2,00	4	39,7	0,65	4	15,3	0,25	9
SO ₄ ⁻⁻	165,0	3,44	89	2375,0	49,48	91	675,0	14,06	85	77,0	1,60	55
Cl ⁻	4,0	0,11	3	81,0	2,28	4	58,0	1,63	10	29,0	0,82	28
NO ₃ ⁻	5,7	0,09	2	22,0	0,35	1	10,1	0,16	1	13,6	0,22	8
NO ₂ ⁻	0,06	-	-	0,06	-	-	0,03	-	-	0,05	-	-
PO ₄ ⁻⁻⁻	0,06	-	-	0,12	-	-	0,03	-	-	0,02	-	-
Summe	275,1			3577,9			1153,0			197,0		
Kationen		4,26	100		49,57	100		18,47	100		3,00	100
Anionen		3,89	100		54,11	100		16,50	100		2,89	100
rel. Fehler*		4,5%			-4,4%			5,6%			1,9%	

* Der relative Fehler errechnet sich aus: $\frac{\text{Summe K} - \text{Summe A}}{\text{Summe K} + \text{Summe A}} \cdot 100 \%$

- nicht nachgewiesen

Tab. 29: Chemische Analysen des wäßrigen Lösungsauszuges von 4 Staubproben

	Probengewicht (g)	Salzgewicht (Abdampf- rückstand) (g)	Salzanteil (aus Abdampf- rückstand) (Gew%)	Salzgewicht (analytisch erfaßt) (g)
ST 1	12,14	0,28	2,3	0,28
ST 2	16,19	3,77	23,3	3,58
ST 3	8,26	1,44	17,4	1,15
ST 4	1,89	0,24	12,7	0,20

Tab. 30: Salzanteile im Straßenstaub

5.6.2. Gasförmige Stoffe

Die Atmosphäre der Erde besteht konstant aus 78 Vol.-% Stickstoff, 21 % Sauerstoff, 1 % Argon und weiteren Edelgasen sowie etwa 0,03 Vol.-% Kohlendioxid. Mit Ausnahme der Edelgase nehmen diese Stoffe in lebhaftem Maß an Kreisläufen durch die Hydrosphäre, die Lithosphäre und die Biosphäre teil. In der Luft befindet sich außerdem eine Reihe von weiteren Gasen, die zeitlich und lokal in wechselnden Konzentrationen vorhanden sind. Sie gelangen aus unterschiedlichsten Quellen in die Atmosphäre, verweilen dort für eine gewisse Zeit, werden durch die Luftbewegung transportiert, durch chemische Prozesse teilweise verändert und lagern sich schließlich wieder auf der Erdoberfläche ab oder werden von der Biosphäre und Hydrosphäre aufgenommen.

In den nachfolgenden Abschnitten werden die für die Werksteinverwitterung wichtigeren Stoffe CO_2 , SO_2 und NO_x näher betrachtet. Von gewisser Bedeutung ist auch der Sauerstoff (O_2) bzw. das Ozon (O_3) durch die oxidierende Wirkung auf andere Luftschadstoffe und auf Baustoffe. Über die Bedeutung des Wasserdampfes wurde bereits in Abschnitt 5.1.1. berichtet.

Die verwitterungswirksamen Stoffe in der Luft sind teils an natürlichen Kreisläufen beteiligt, teils entstammen sie anthropogenen Prozessen und hier besonders der Energiegewinnung aus fossilen Brennstoffen. Die anthropogen in die Atmosphäre gelangenden Stoffe bezeichnet man deshalb als Luft-"Verunreinigungen", oder, wenn sie Schädigungen an der Lebewelt oder an Sachgütern befördern und verursachen können, auch als "Luftschadstoffe".

Die von den Schadstoffquellen ('Emittenten': Industriebetriebe, Kraftwerke, Heizungsanlagen, Kraftfahrzeuge) an die Luft abgegebenen Stoffmengen sind 'Emissionen'; sie werden durch die Luftbewegung verblasen ('Transmission'), verdünnt und mehr oder weniger weit transportiert und bilden dann die an beliebigen Orten meßbare 'Immissions'-Belastung der Luft. Emissionen und Immis-

Tab. 31: Emissionen, die bei der Energiegewinnung aus fossilen Brennstoffen entstehen (Mittelwerte)
(nach HAURY, SCHIKARSKI, THÖNE 1974 und TÜV Rheinland 1972 in BMFT 1977)

Emittenten	kg Schadstoff pro t SKE (Primärenergieverbrauch)					
	SO_2	NO_x	CO	Staub	C_mH_n	
Stromerzeugung aus Steinkohle	23 - 26	7 - 8,5	0,1 - 0,5	3,5 - 4,5	0,1	
Stromerzeugung aus Braunkohle	23	8,5	0,1	4,5	0,1	
Stromerzeugung aus Öl	23	7	0,1	1,0	0,2	
Stromerzeugung aus Gas	-	5	-	-	-	
g Schadstoff pro 1 Kraftstoff						RuG
Autoverkehr PKW	0,4	3,5 - 11,2	229 - 369		8,6 - 12,4	
Autoverkehr LKW	4,1	7,1 - 9,7	30 - 45		1,8 - 2,6	1,5 - 1,6
g Schadstoff pro t Erdöl						
Emission einer Raffinerie	2,4	8 - 10	0,3			

SKE = Steinkohleneinheit; 1 SKE = Wärmeäquivalent von 1 kg Steinkohle = 29,2 MJ

sionen sind mittlerweile meßtechnisch weitgehend erfassbar; für beide Schadstofferscheinungen liegen verbindliche gesetzliche Grenzwerte vor (z.B. in der 'Ersten Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz' ('Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft', Bonn 1974, seither in Teilen verändert) oder im 'Bayerischen Immissionsschutzgesetz', München 1974). Die Sorge für die Einhaltung der Grenzwerte obliegt im Falle der Emissionen den Betreibern entsprechender Anlagen, im Falle der Immissionen den öffentlichen Behörden.

Bis zur Neufassung der TA Luft vom August 1974 wurden die Emissionen weitgehend ungefiltert an die Umwelt abgegeben. Seither wurden große Anstrengungen zur Eindämmung der Luftverunreinigungen unternommen; die sich dafür bietenden Möglichkeiten sind heute bei weitem noch nicht ausgeschöpft. Die Entwicklung der Meßtechnik ist weitgehend abgeschlossen, der Aufbau von Meßnetzen allerdings noch in vollem Gang. Erst seit wenigen Jahren liegen kontinuierliche Messungen der wichtigsten Schadstoffe vor.

In Ballungsgebieten und in Städten ist mit höheren Immissionswerten zu rechnen als auf dem freien Land. Die Verteilung der Immissionen erfolgt gerade in einer Stadt sehr ungleichmäßig; sie hängt ab von dem Charakter der Emissionen, von der Wetterlage und den baulichen Einflüssen. Emissionen werden durch die Windbewegung rasch verdünnt; bei höheren Windgeschwindigkeiten sinken die Immissionsmeßwerte. Hohe Schadstoffbelastungen sind bei Nebel zu erwarten, wenn sich die Schadstoffe an Wassertropfchen anbinden, sowie bei austauscharmen Wetterlagen (Inversionen), wenn die über der Stadt stagnierende Luft sich allmählich mit Schadstoffen und Staub anreichert. Inversionswetterlagen kommen in München an etwa 80 Tagen im Jahr, vorwiegend im Winterhalbjahr, vor.

5.6.2.1. Kohlendioxid (CO₂)

Kohlendioxid gelangt durch vulkanische Tätigkeit, durch die Zersetzung von toter organischer Substanz, durch die Atmungsaktivität der Lebewesen sowie seit einiger Zeit durch die Nutzung fossiler Brennstoffe in die Atmosphäre. Es wird der Atmosphäre direkt oder indirekt entzogen durch Aufnahme im Niederschlags-, Grund- und Meerwasser, durch Ablagerung in Carbonatmineralien und durch die CO₂-Absorption der Pflanzen im Zuge der Photosynthese. Die An- und Abreicherungsprozesse standen vermutlich über sehr lange Zeiten hinweg im Gleichgewicht miteinander, so daß der CO₂-Gehalt der Atmosphäre in der vorindustriellen Vergangenheit als konstant angesehen wird.

Schätzungen sprechen für die Zeit zwischen 1860 und 1890 von einem weltweit wirklichen Gehalt von 0,029 Vol.-% CO₂ an der Gesamtluftmenge. Durch die im 19. Jahrhundert beginnende, extensive Nutzung der fossilen Brennstoffe gelangten bis heute zusätzlich große Mengen von CO₂-Gas in die Atmosphäre. Auch dieses CO₂ geht in den CO₂-Kreislauf ein; bei erhöhtem CO₂-Angebot werden größere Mengen von CO₂ im Meerwasser und in die Pflanzensubstanz aufgenommen. Dennoch macht sich seit einigen Jahrzehnten ein allmählich ansteigender CO₂-Gehalt der Atmosphäre bemerkbar, der mittlerweile bei Werten von 0,035 bis 0,04 Vol.-% angelangt ist (Abb. 22).

CO₂-Gas wird in kondensierendes Niederschlagswasser aufgenommen. Etwa 0,2 % der im Wasser gelösten Menge an CO₂ bildet mit Wassermolekülen zusammen Kohlensäure (H₂CO₃), die aufgrund ihrer geringen Neigung zur Dissoziation nur schwach sauer reagiert und den natürlichen pH-Wert des Niederschlags von 5,5 bis 6 hervorruft. Kohlensäurehaltiges Wasser vermag Carbonatmineralien aufzulösen, und zwar in großem Umfang, denkt man an die Verkarstung großer Landschaftsgebiete. Auch beregnete carbonatische Naturwerksteine wittern rasch rauh aus ("Mikrokarst"). Berücksichtigt man allerdings, daß die zur Verkarstung nötige Kohlensäure in entscheidendem Maße erst dem Sickerwasser in der belebten Bodenzone zugeführt wird und zudem für die Verkarstung sehr lange

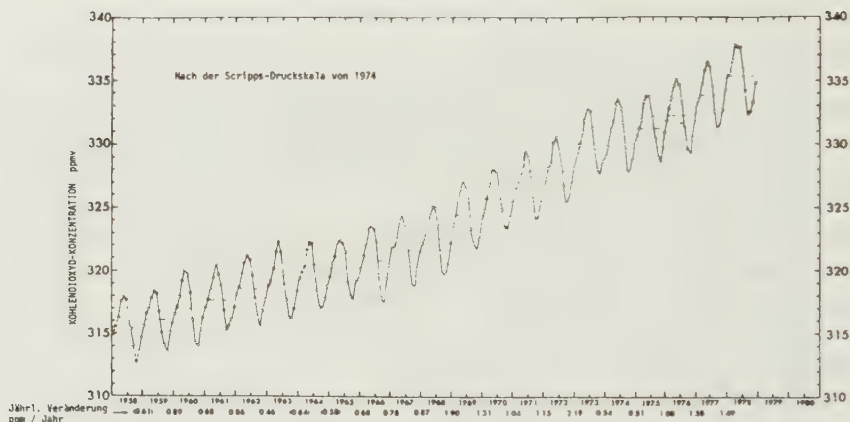


Abb. 22: Entwicklung der Kohlendioxidkonzentration in der Atmosphäre seit 1958 (Hawaii) (aus: GLOBAL 2000, 1980)

Zeiträume zur Verfügung stehen, so dürfte die Kohlensäureverwitterung an carbonatischen Werksteinen im heutigen städtischen Milieu im Vergleich zur aggressiveren Schwefelsäureverwitterung nur von untergeordneter Bedeutung sein.

In der Stadt gelangen zusätzliche CO_2 -Mengen durch den Kraftfahrzeugverkehr in die Luft. Oberhalb einer Verbrennungstemperatur von 400°C entsteht zusätzlich zum Kohlendioxid auch Kohlenmonoxid (CO), ab 1000°C wird nach dem BOUDOUARD-Gleichgewicht nur noch CO emittiert. Das bei hohen Temperaturen entstehende CO sollte sich bei tieferen Temperaturen in CO_2 und C aufspalten bzw. durch Reaktion mit Wassermolekülen CO_2 und H_2 bilden. Die entsprechenden Reaktionen laufen jedoch derart langsam und träge ab, daß CO wie ein inertes Gas in der nicht verunreinigten Atmosphärenluft existieren kann. Einzig Metallkatalysatoren, die im Staub der Stadtluft vorhanden sind, oder das Vorliegen anderer reduzierbarer Substanzen beschleunigen die Umsetzung. Über die Menge des in städtischem Milieu zu CO_2 umgesetzten CO und über seine Bedeutung für andere Luftschadstoffe existieren bislang keine Angaben. Nach Messungen des Bayerischen Landesamtes für Umweltschutz (Luftthygienische Jahresberichte) beträgt die CO -Konzentration in München im Mittel um 2 ppm. Die Konzentrationsverläufe sind sehr stark verkehrsabhängig (vgl. DITTMANN 1982); die höchsten $1/2$ Std.-Mittelwerte an einzelnen Münchner Meßstellen erreichten in den 70er Jahren bis zu 40 ppm CO in der Luft.

Erst der Kohlendioxidgehalt feuchter Luft oder kohlendioxidhaltiges Wasser ermöglicht das Rosten von eisenhaltigen Metallen, das über die Bildung von Eisencarbonat hin zur Entstehung des Eisen(III)-Oxidhydrates $\text{FeO}(\text{OH})$ führt. Rost kann die dauerhafte Verfärbung von Gesteinsoberflächen bewirken; die Raumausdehnung auf fast das 10fache des Ausgangsvolumens verursacht bei fest eingespannten, rostenden Eisendubeln den Bruch der verklammerten Werkstücke (Rostsprengung). Auch die Patinabildung an Kupferblechen und Bronzen wird durch Kohlendioxid mit der Entstehung des basischen Kupfercarbonates Malachit ($\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$) gefördert.

5.6.2.2. Schwefeldioxid (SO_2)

Das in der Atmosphäre befindliche SO_2 -Gas löst sich im Niederschlags- und im Kondenswasser unter Bildung von schwefeliger Säure (H_2SO_3), die nach kurzer Zeit in Schwefelsäure (H_2SO_4) übergeht. Die dabei ablaufenden Oxidationsprozesse können beschleunigt werden durch die Anwesenheit von katalytisch wirkenden Stoffen (z.B. Metalloxiden) im Niederschlagswasser bzw. an den benetzten Materialoberflächen.

Auch bereits in gasförmigem Zustand können SO_2 -Moleküle zu Sulfit- und Sulfatpartikeln, wie z.B. $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, $(\text{NH}_4)\text{HSO}_4$ u.a.m., aufoxydiert werden. Hierbei spielt die 'photochemische Gasphasenoxydation' eine entscheidende Rolle (UBA 1980), für die starke Oxidationsmittel wie Ozon oder gewisse Stickstoffverbindungen durch den Einfluß des ultravioletten Lichtes bereitgestellt werden. Die SO_2 -Oxydationsrate in belasteter Stadtluft liegt im Sommer bei etwa 2-4 %/h, in mitteleuropäischen Gebieten mit geringer Luftverschmutzung bei etwa 0,5 %/h (UBA 1980).

Der Schwefelkreislauf, in den die SO_2 -Gase und die daraus entstehenden Verbindungen einbezogen sind, besteht aus einer ganzen Reihe von miteinander verzahnten Teilkreisläufen (MATTHESS 1961). Aus vulkanischen Emanationen sowie durch die Lebenstätigkeit von Bakterien, welche Eiweißstoffe und mineralische Schwefelverbindungen zersetzen, gelangt wohl die Hauptmenge an schwefelhaltigen Gasen aus natürlichen Quellen in die Atmosphäre.

Problematisch in Hinblick auf die Gesteinsverwitterung sind aber nicht diese weltweit und auf natürliche Weise entstehenden Schwefelmengen, sondern die anthropogenen Schwefeldioxid-Emissionen in unseren Industriezentren und Großstädten, die bei der Nutzung fossiler Brennstoffe - vor allem schwefelhaltiger Kohle und Mineralölprodukte - in großem Umfang als "Rauchgase" entstehen (vgl. Tab. 31). 1978 wurden in der Bundesrepublik 3,6 Mio. t SO_2 aus anthropogenen Quellen emittiert. Über 90 % dieser Menge wurde bei Verbrennungsvorgängen erzeugt, der Rest im Verlauf industrieller Herstellungsprozesse (UBA 1980).

Zur Mengenabschätzung des allein aus natürlichen Quellen stammenden SO_2 -Gehaltes der Luft könnten Messungen in sog. "Reinluftgebieten" dienen. Messungen des Umweltbundesamtes in den Jahren 1973 bis 1978 zeigten eine derartige Grundbelastung im Jahresmittel in Höhe von 0,005-0,020 mg SO_2/m^3 Luft an (UBA 1980). 1982 lag das Jahresmittel der SO_2 -Belastung in München bei etwas über 0,03 mg SO_2/m^3 Luft gegenüber 0,13 mg/ m^3 im Jahre 1965. Die SO_2 -Belastung nimmt dabei von der Stadtmitte zu den Stadtrandbereichen kontinuierlich ab.

Durch die relativ lange Verweildauer von SO_2 in der Atmosphäre im Bereich von Stunden bis zu einigen Tagen und befördert auch durch die Emission aus hohen Schornsteinen heraus können sich die SO_2 -Immissionen über weite Regionen hinweg verbreiten. Dies führt dazu, daß die SO_2 -Grundbelastung selbst in weit von industriellen Zentren entfernt gelegenen Gebieten bis heute steigende Tendenz aufweist. Demgegenüber werden in den Ballungsgebieten seit den 60er Jahren rückläufige SO_2 -Konzentrationen festgestellt. Dies gilt insbesondere für München, wo der Ersatz von Kohle und Öl durch Erdgas bei der städtischen Energieversorgung und der Ausbau des Fernwärmenetzes in den 60er Jahren zu einem Rückgang der SO_2 -Emissionen um ca. 15 000 t jährlich geführt haben (vgl. 5.10.1.2.).

Abb. 23 zeigt für die Jahre 1976-1978 die vom Bayerischen Landesamt für Umweltschutz ermittelten monatlichen SO_2 -Immissionen Münchens. Man erkennt die an den einzelnen Meßstationen sehr unterschiedlichen Werte, sowohl was die Spitzenbelastung der höchsten 1/2-Stunden-Mittelwerte, als auch was die Monatsmittelwerte angeht. Allgemein hohe Werte treten jeweils im Winterhalbjahr auf, was für die Herkunft der Schadstoffbelastungen aus der Heizwärmeerzeugung und für das im Winter häufigere Auftreten von Inversionswetterlagen spricht, in denen der behinderte Luftaustausch zur Anreicherung der Schadstoffe führt (vgl. auch Abb. 7).

Meßwerte der SO_2 -Immissionen, die durch verschiedene Analysenverfahren gewonnen werden und für München seit 1965 kontinuierlich vorliegen (BLFU 1982), geben einen aktuell bestehenden bzw. einen über eine gewisse Zeit gemittelten SO_2 -Gehalt in 1 m^3 Luft wieder. Für die Werksteinverwitterung wichtig ist darüber hinaus die Kenntnis der von einer Baustoffoberfläche in der Zeiteinheit aufgenommenen Menge an SO_2 : Die sog. " SO_2 -Immissionsrate". Hierfür wurde am Zollern-Institut in Dortmund eine spezielle Immissions-Raten-Meß-Anlage (IRMA) entwickelt und patentiert, deren Funktionsweise und Betrieb in der Richtlinie VDI 3794 Bl. 1 geregelt sind (LUCKAT 1972).

Jahresgänge der monatlichen SO₂-Immissionen im Raum München

Schwankungsbreiten der Mittelwerte von 15 Meßstellen im Zeitraum: 1976-1977-1978

Zusammengestellt nach Daten des Bayer. Landesamtes für Umweltschutz

Ermittlung der Werte nach der Technischen Anleitung zur Reinhaltung der Luft vom 28.8.1974

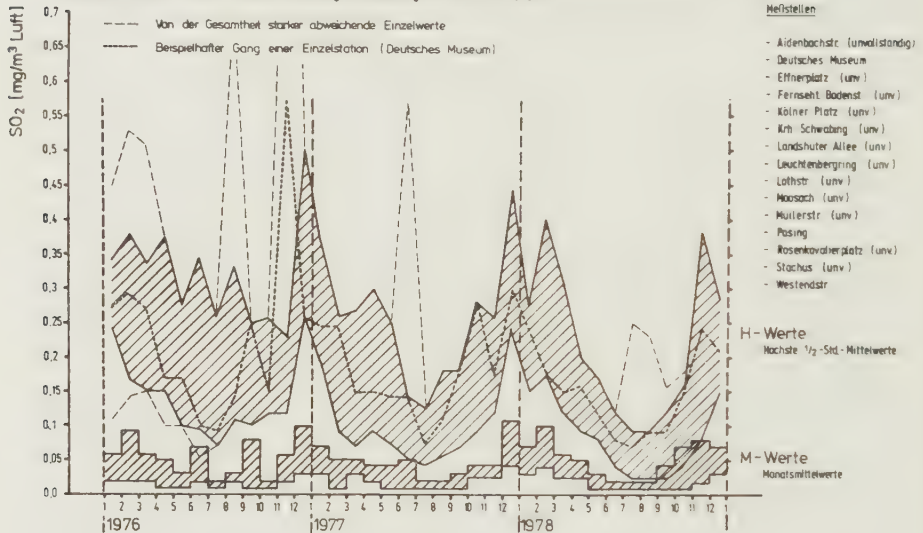


Abb. 23: Jahresgänge der monatlichen SO₂-Immissionen in München
(nach Daten des Bayerischen Landesamtes für Umweltschutz)

In LUCKAT (1981) sind Jahresmittelwerte der SO₂-Immissionsrate (mg/m²d) für 20 über die Bundesrepublik verstreute Meßstationen angegeben, die sich zwischen 7 mg/m²d (Neuschwanstein) und 126 mg/m²d (Duisburg) bewegen.

Die schädliche Wirkung der Schwefelsäure bzw. des SO₂-Anteils der Rauchgase auf die Bausubstanz wurde schon sehr frühzeitig erkannt. NIESEL (1979) zitiert entsprechende englische Berichte aus der Mitte des 17. Jahrhunderts. Beobachtungen von massiven Schädigungen in der Umgebung von Industriezentren, die Registrierung der anscheinend parallel verlaufenden Prozesse von steigender Luftverschmutzung und progressiv verlaufenden Verwitterungsschäden an Baudenkmalern (WINKLER 1975) sowie die bekannte Tatsache, daß durch Einwirkung von Schwefelsäure auf Kalk Gips und Kohlensäure entstehen, stützten diese Vermutungen ebenso wie die in den Ballungsgebieten häufig sich entwickelnden schwarzen Gipskrustenbildungen auf Carbonatgesteinen (vgl. auch ENDLICHER 1984). Lange Zeit standen allerdings weder exakte Meßdaten über die Verbreitung der Luftschadstoffe noch genaue Kenntnisse über die Umwandlung von SO₂ in SO₃ und SO₄ zur Verfügung, so daß RIEDERER (1973) schließlich über die "Wirkungslosigkeit von Luftverunreinigungen beim Steinzerfall" nachdachte.

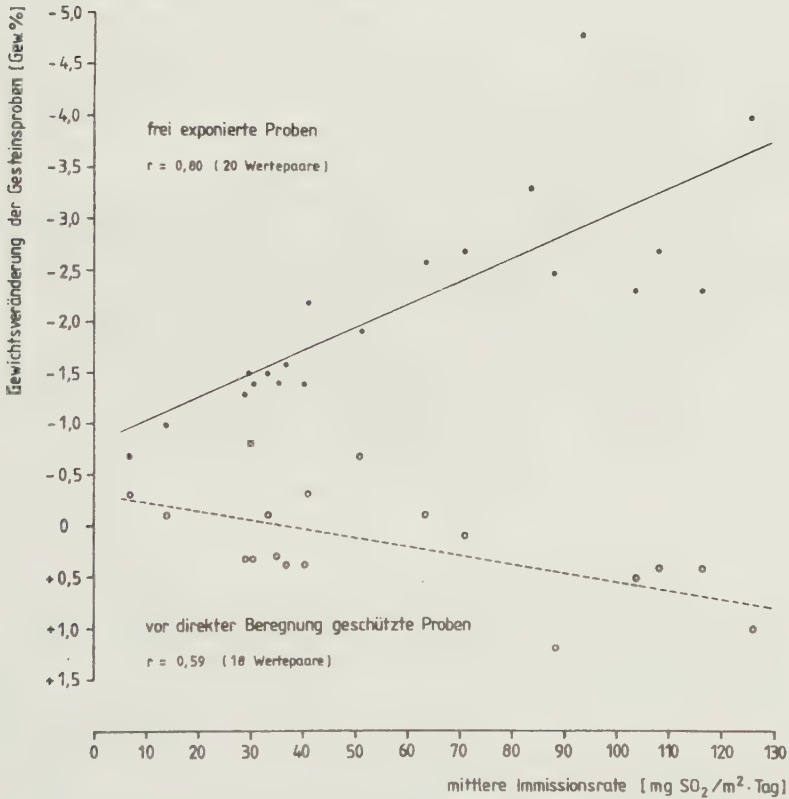
1981 konnte LUCKAT einen ersten, durch exakte Messung begründeten Nachweis für den Zusammenhang zwischen der Höhe der SO₂-Immissionsrate und des Verwitterungsfortschrittes an Naturwerksteinen erbringen (LUCKAT 1981). In einem Testversuch bestimmte er an 20 über die Bundesrepublik verteilten Orten u.a. die SO₂-Immissionsrate mit Hilfe des IRMA-Verfahrens. Dazu exponierte er an jedem

Baumberger Sandstein

(Obere Kreide, Münsterland. - Calcitisch gebunden)

Expositionsdauer: 1 Jahr (1978/79)

Ergebnisse nach LUCKAT (1981)



Meßorte (in der Reihenfolge abnehmender Immissionsrate)

- | | | |
|----------------|-----------------|------------------|
| - Duisburg | - Mainz | - Konstanz |
| - Regensburg | - Wilhelmshaven | - Bamberg |
| - Braunschweig | - Ulm | - Passau |
| - Köln | - Selent | - Fulda |
| - Essen | - Lübeck | - Friedrichstadt |
| - Soest | - Haus Aist | - Neuschwanstein |
| - Dortmund | - Freiburg | |

Abb. 24: Zusammenhang zwischen der SO₂-Immissionsrate und der Gewichtsveränderung exponierter Gesteinsproben (Zeichnung nach den Meßergebnissen von LUCKAT 1981)

Meßort dünne Steinplättchen aus Baumberger Sandstein und Krensheimer Muschelkalk. Nach 1 Jahr Versuchsdauer ergab die Auswertung, daß die unter freiem Himmel exponierten Steinplättchen durch Lösung und Auswaschung um so mehr an Gewicht verloren hatten, je höher die SO_2 -Immissionsrate am Ort gewesen ist, während bei den unter einem Schutzdach angebrachten Gesteinsproben eine entsprechende Gewichtszunahme durch Schmutzablagerungen zu verzeichnen war (vgl. Abb. 24).

Schwefelsäure wirkt korrodierend auf Carbonatmineralien, die beim Kontakt mit der Säure zu Gips umgewandelt werden. In ihrem Bestand besonders gefährdet sind Sandsteine mit einem relativ geringen Carbonatgehalt, der jedoch als Bindemittel den Zusammenhang des Korngerüstes gewährleistet. Dagegen wird die Säurewirkung bei reinen Kalksteinen durch die große Carbonatmasse aufgefangen, ohne daß es zu gravierenden Schädigungen kommen muß.

Als wichtigster Verwitterungsfaktor wird gemeinhin immer wieder die im Niederschlagswasser gelöste Schwefelsäure ('saurer Regen') angesehen. Mittlerweile kann man jedoch davon ausgehen, daß "der Hauptteil der Schwefelsäureeinwirkung von der trockenen Deposition von SO_2 auf der Oberfläche und der anschließenden Schwefelsäurebildung ausgeht" (SNETHLAGE 1984, S. 63; vgl. auch RONICKE & RÖNIKE 1972, FURLAN & GIRARDET 1983 und KRAUS 1985).

Bei dem direkten Lösungsangriff durch Schwefeldioxid bzw. Schwefelsäure entstehen Sulfatsalze. Diese Salze, die auch aus carbonatischen Partikeln des Luftstaubes hervorgehen können, bauen die durch Ruß schwarz gefärbten Gipskrusten der nicht beregneten Bauwerksflächen auf. Sie können sich außerdem in den Kapillarwassersäumen der Gesteine anreichern, wo sie beim Ausblühen physikalisch belastend auf das Gesteinsgefüge einwirken.

5.6.2.3. Stickoxide (NO_x)

Schädliche Einwirkungen auf Naturwerksteine in einem Ausmaß, wie es bei den Schwefeloxiden bekannt ist, können bei Stickoxiden nicht beobachtet werden. Bereits erwähnt wurde die Rolle von Stickoxiden bei der photochemischen Oxidation von SO_2 zu Sulfat- und Sulfatpartikeln. Höhere NO_x -Gehalte in den verkehrsreichen Großstädten fördern also die Schadenswirkung der SO_2 -Immissionen.

NO_x -Moleküle unterliegen selbst chemischen Reaktionen, sie gehen in NO_2^- - oder NO_3^- -Ionen über, die im Regenwasser und zusammen mit der Luftfeuchtigkeit Sauren bilden und in Reaktion mit Feststoffen zu Nitrit- und Nitratsalzen werden. Tatsächlich finden sich in chemischen Analysen von Niederschlags- und Schneeschmelzwasser, von Gipskrusten und Ausblüungssalzen immer auch Nitrate und teils überraschend hohe Werte von Nitrit.

NO_x -Immissionen stammen ebenfalls aus der Verbrennung fossiler Energiestoffe; über die Hälfte des NO_x wird von Kraftfahrzeugen emittiert (vgl. auch Tab. 31). Hohe Motortemperaturen und mithin eine schnelle Fahrweise erhöhen den NO_x -Ausstoß. Nach freundlicher Mitteilung von Herrn Dipl.-Ing. v. LAER haben sich die Automotoren allerdings erst seit Mitte der 70er Jahre zu maßgeblichen NO_x -Emitenten entwickelt, als man zur Energieeinsparung in der Automobilindustrie allgemein höhere Verbrennungstemperaturen anstrebte (vgl. auch Abb. 34 in 5.10.1.4.).

Die vom Bayerischen Landesamt für Umweltschutz routinemäßig durchgeführten Bestimmungen des NO_x -Gehaltes der Luft beruhen auf der Messung der Chemilumineszenz, die bei der Reaktion von NO mit Ozon entsteht ($\text{NO} + \text{O}_3 = \text{NO}_2 + \text{O}_2 + \text{Strahlung}$). Der NO-Gehalt der Probeluft wird auf diese Weise direkt gemessen. Andere Stickstoffoxide, wie vor allem NO_2 , werden vor der Bestimmung in einem

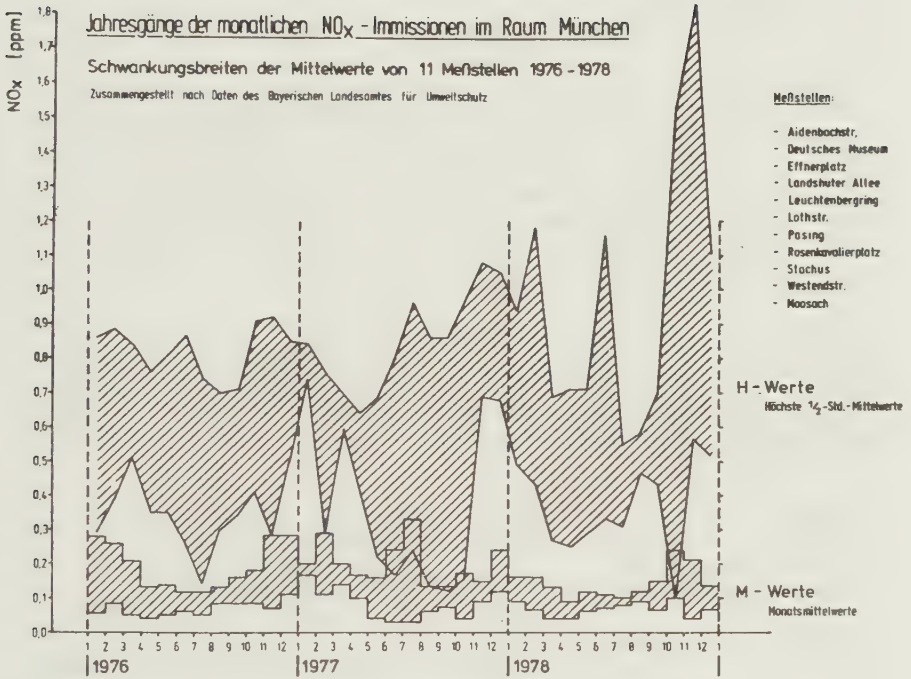


Abb. 25: Jahresgänge der monatlichen NO_x -Immissionen in München
(nach Daten des Bayerischen Landesamtes für Umweltschutz)

Konverter zu NO reduziert und zusammen mit dem normal vorhandenen NO gemessen. Aus letzterem Verfahren geht die Meßgröße " NO_x " hervor; durch Differenzbildung $\text{NO}_x - \text{NO}$ erhält man den Wert für NO_2 (BLfU 1982).

Bei den Jahresgängen der monatlichen Mittelwerte der NO_x -Immissionen von 1976 bis 1978 in München (Abb. 25) zeigen die höchsten 1/2-Stunden-Mittelwerte recht uneinheitliche Verläufe, die offenbar von der jeweiligen Wetterlage und Verkehrssituation an den Meßstationen abhängig sind. Bei den Monatsmittelwerten scheinen regelmäßig im Winterhalbjahr etwas höhere Gehalte vorzuliegen. Hierfür können der Heizungsbetrieb und eine Häufung austauscharmer Wetterlagen verantwortlich sein.

LAHMANN & PRESCHER (1978) stellten bei Messungen in Berlin einen starken Einfluß der Kraftfahrzeugabgase auf den Stickstoffgehalt der Luft fest. Es ergaben sich ausgeprägte und von der Verkehrsdichte abhängige Tagesgänge, außerdem eine hohe Korrelation zwischen NO_x - und CO -Meßwerten. Die NO_x -Gehalte der Luft gingen in 50 m Abstand vom Straßenrand auf etwa 50 % der direkt an der Straße gemessenen Werte zurück, wobei die Abnahme bei NO 60 %, die Abnahme bei NO_2 dagegen nur knapp 20 % ausmachte.

5.6.3. Gelöste Stoffe

5.6.3.1. Säuregehalt des Niederschlags

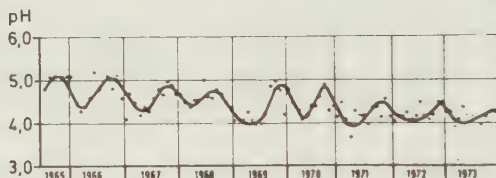
Im normalen, kohlensauren Niederschlagswasser stellt sich ein schwach saurer pH-Wert zwischen 5,5 und 6 ein. Sind zusätzlich zur Kohlensäure noch weitere, stärkere Säuren vorhanden, erniedrigt sich der pH-Wert entsprechend, man spricht von 'saurem Regen'. Im allgemeinen wird der Säuregehalt des 'sauren Regens' auf Schwefelsäure und letztlich auf die weit verbreiteten SO_2 -Immissionen zurückgeführt. Neben Schwefelsäure können aber auch andere Säuren den pH-Wert des Niederschlagswassers erniedrigen, etwa Salpetersäure (vgl. Abschnitt 5.6.3.3.), Salzsäure und andere, aus lokalen Emissionen stammende Säuren. Alle Säuren greifen Carbonatminerale an; im Fall der Schwefelsäure wird Carbonatsubstanz zu Gips umgewandelt.

Abb. 26 zeigt die leichte, aber kontinuierlich erfolgende Abnahme der pH-Werte des Niederschlags an der Station Schauinsland im Schwarzwald während der Dekade 1965 - 1973. Daß sich die pH-Werte an dieser von Ballungszentren fern gelegenen Station bereits an $\text{pH} = 4$ angenähert haben, liegt möglicherweise an einem besonderen meteorologischen Mechanismus, durch den Schadstoffimmissionen bevorzugt im Mittelgebirgsbereich durch Niederschläge aus der Atmosphäre ausgewaschen werden.

Abb. 26:

pH-Werte im Niederschlag
an der Station Schauinsland
1965 - 1973

(aus KAYSER 1974 in REH-
FUSS 1981)



KRAUS (1985) teilt mit, daß in Köln gemessene pH-Werte des Regens von 6,8 in den Jahren 1958/59 auf mittlerweile $\text{pH} = 4 - 5$ gesunken sind, was den Verhältnissen im bundesdeutschen Durchschnitt entsprechen soll.

Für München gibt das Bayerische Landesamt für Umweltschutz seit 1981 Meßwerte an, deren Jahresmittelwerte sich von $\text{pH} = 5,7$ (1981) über $\text{pH} = 5,9$ (1982) zu $\text{pH} = 6,3$ (1983) entwickelt haben, was als Zeichen für eine Verbesserung der lufthygienischen Situation - zumindest in München - gesehen werden kann. Diese Werte entstammen allerdings Messungen von Niederschlagswasser, das bei der Sammlung des Staubbiederschlags angefallen ist und im Kontakt zu den Carbonatpartikeln des Staubes zu einem Teil bereits neutralisiert sein kann (vgl. KETTNER 1979). Die Einzelwerte reichen denn auch von $\text{pH} = 4$ ('saurer Regen') über die pH-Bereiche des kohlensäuren Wassers bis $\text{pH} = 7$ und darüber (Gleichgewichts-pH eines carbonatgesättigten Wassers).

Die gleichzeitige Ermittlung von Staubbiederschlag und pH-Wert erlaubt im übrigen die Gegenüberstellung beider Meßgrößen (Abb. 27). Es läßt sich aus der Darstellung kein zwingender Zusammenhang zwischen der Höhe des Staubbiederschlags und der Höhe der pH-Werte ersehen, der darauf hindeutet, daß das Regenwasser um so stärker neutralisiert vorliegt, je mehr Staub sich in der Luft befindet. Einzig im Bereich sehr geringen Staubbiederschlags von unter $50 \text{ mg/m}^3 \text{ d}$ kommen pH-Werte über 6 nur sehr vereinzelt vor.

Man muß vermuten, daß besonders niedere pH-Werte zu Anfang eines Regens zu erwarten sind, wenn die in der Luft angesammelten Schadstoffe konzentriert ausge-

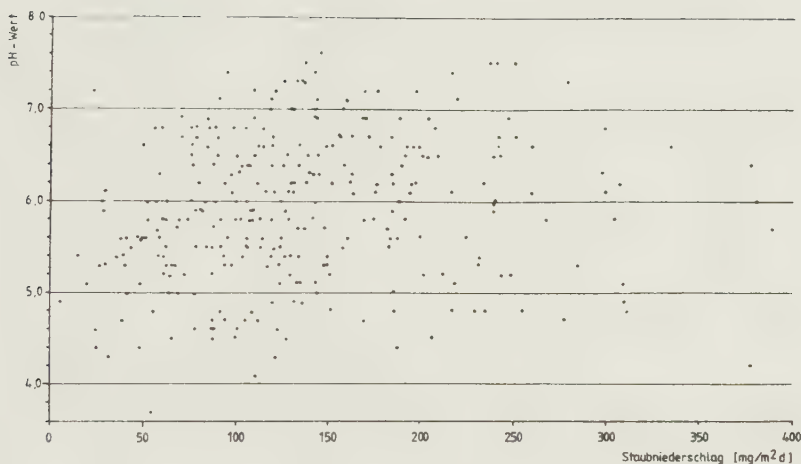


Abb. 27: Menge des Staubniederschlags und pH-Werte des bei den Staubniederschlagsmessungen gesammelten Niederschlagswassers an 11 Münchner Meßstationen von 1981 bis 1983
(nach Daten des Bayerischen Landesamtes für Umweltschutz)

waschen werden. Nach längerer Niederschlagsdauer sollte sich dann der "natürliche" pH-Wert des allein kohlensauren Wassers einstellen.

SNETHLAGE (1984) rät allgemein davon ab, den pH-Wert-Angaben allzu große Bedeutung beizumessen, da auch nur sehr schwach schwefelsaures Regenwasser sich beim Verdunsten zu hochkonzentrierter Säurelösung anreichern kann. Überdies kommt, wie bereits erläutert, dem sauren Niederschlagswasser bei der Gesteinsverwitterung eine weit geringere Bedeutung zu, als bisher angenommen; die entscheidenden Schadstoffmengen gelangen als trockener SO_2 -Niederschlag auf die Gesteinsflächen und bilden sich erst im Kontakt mit der sorbierten Luftfeuchte zur aggressiven Schwefelsäure um.

5.6.3.2. Wasserlösliche Stoffe

Eine große Zahl von Gesteinsschädigungen steht mit dem Vorkommen und Wirken leicht wasserlöslicher Stoffe in Verbindung. Bei Analysen von verwitterten Gesteinsproben oder von Ausblühungen werden ganz allgemein Sulfate, Chloride, Nitrate und Carbonate festgestellt, die zusammen mit den Kationen Calcium, Magnesium, Natrium, Kalium und Ammonium Salze in unterschiedlicher Zusammensetzung und Kombination aufbauen. Viele dieser Salze kommen bei den vorherrschenden klimatischen Bedingungen in mehreren Hydratstufen vor, wodurch sich die Zahl der möglichen Mineralphasen noch beträchtlich erhöht. Die meisten der in Tab. 32 aufgeführten Salze sind "leicht löslich", d.h. in 1 l reinem Wasser löst sich mehr als 100 g Substanz. Das Löslichkeitsprodukt leicht löslicher Salze steigt in der Regel mit zunehmender Temperatur und auch bei Anwesenheit anderer gelöster Stoffe an.

Tab. 32: Ausblühungssalze und deren Hydratstufen

Sulfate			NaCl	Halit (Steinsalz)
CaSO ₄		Anhydrit	NaCl · 2 H ₂ O	Dihydrat
CaSO ₄ · 0,15 H ₂ O		-	KCl	Sylvin
CaSO ₄ · 0,5 H ₂ O		Bassanit	Nitrate	
CaSO ₄ · 2 H ₂ O		Gips	Ca(NO ₃) ₂	Kalksalpeter
MgSO ₄ · 1 H ₂ O		Kieserit	Ca(NO ₃) ₂ · 3 H ₂ O	-
MgSO ₄ · 6 H ₂ O		Hexahydrat	Ca(NO ₃) ₂ · 4 H ₂ O	-
MgSO ₄ · 7 H ₂ O		Epsomit (Bittersalz)	Mg(NO ₃) ₂	-
MgSO ₄ · 12 H ₂ O		Dodekahydrat	Mg(NO ₃) ₂ · 2 H ₂ O	-
Na ₂ SO ₄		Thenardit	Mg(NO ₃) ₂ · 6 H ₂ O	-
Na ₂ SO ₄ · 10 H ₂ O		Mirabilit (Glaubersalz)	NaNO ₃	Chilesalpeter
K ₂ SO ₄		-	KNO ₃	Salpeter
(NH ₄) ₂ SO ₄		-	5 Ca(NO ₃) ₂ · 4 NH ₄ NO ₃ · 10 H ₂ O	-
3 CaO · Al ₂ O ₃ · CaSO ₄ · 12 H ₂ O		Monosulfat	Carbonate	
3 CaO · Al ₂ O ₃ · 3 CaSO ₄ · 12 H ₂ O		Ettringit	Ca(HCO ₃) ₂	Bicarbonat
CaSiO ₃ · CaCO ₃ · CaSO ₄ · 15 H ₂ O		Thaumasit	Na ₂ CO ₃	Soda
Chloride			Na ₂ CO ₃ · 1 H ₂ O	Thermonatrit
CaCl ₂		-	Na ₂ CO ₃ · 7 H ₂ O	Heptahydrat
CaCl ₂ · 2 H ₂ O		-	Na ₂ CO ₃ · 10 H ₂ O	Natron (Kristallsoda)
CaCl ₂ · 6 H ₂ O		-	K ₂ CO ₃ · 1,5 H ₂ O	-
MgCl ₂ · 6 H ₂ O		Bischofit		
2 MgCl ₂ · CaCl ₂ · 12 H ₂ O		Tachhydrit		

Eine Reihe von Ausblühungssalzen bildet sich aus Komponenten, die nicht aus dem Gesteinsmaterial stammen, sondern das Gestein nur als Transportweg und Trägersubstanz für die Salzlösung benutzen. Hierzu gehören z.B. Streusalz, Gipskrusten aus SO₂-Immissionen und Calcitstaub, Ausblühungen aus Abwässern, Salzbildungen aus Baustoffen (Ziegel, Mörtel, Zement etc.).

Bei der Entstehung anderer Salze sind Gesteinskomponenten mit beteiligt. Zumeist handelt es sich dabei um die von Säuren herausgelösten Ca²⁺- und Mg²⁺-Ionen aus Carbonatmineralien, die mit verschiedenen Anionen, meistens mit SO₄²⁻, zu den Ausblühungs- und Krustensalzen reagieren. Hier kommt zusätzlich zu der mechanischen Salztätigkeit beim Aus- und Umkristallisieren die Korrosion der Gesteinsminerale zur Schadenswirkung hinzu. Die Anlösung von Feldspäten und Tonmineralien durch Vorgänge der Werksteinverwitterung ist umstritten.

Die Herkunft der verschiedenen Salzkomponenten ist vielfältig:

- Luftschadstoffe; vor allem SO₂-Moleküle und daraus hervorgehende SO₄²⁻-Ionen; auch Stickoxide; außerdem die im Luftstaub enthaltenen Feststoffe, die entweder bereits in Form von Salzen (Sulfate, Chloride, Nitrate, Carbonate) an die Baumaterialien herangeführt werden oder in Reaktion mit Säuren salzbildende Ionen freisetzen.
- Der Salzgehalt des Regenwassers ist nur gering. Beim Abfließen des Wassers über Dach und Fassadenflächen nimmt es jedoch rasch Schmutzstoffe auf und kann dann als leicht mineralisiertes Ablaufwasser Salze an die Kapillarsaumbereiche der Fassade abgeben.

- Streusalze, die starke Verwitterungsschäden hervorrufen.
Vorwiegend kommt Natriumchlorid zum Einsatz, aber auch Magnesiumchlorid und Calciumchlorid und neuerdings auch chloridfreie Ammoniumverbindungen finden Verwendung.
- Im Grund- und Sickerwasser einer Stadt können sich Salzgehalte aller Art gelöst befinden. Früher enthielten die Abwässer menschlicher Siedlungen neben Sulfaten in hohem Maß organogene Ammoniumverbindungen, die sich durch Tätigkeit von Mikroorganismen und im Kontakt zu carbonathaltigen Baustoffen zu Salpetersalzen wandelten.
- Eine große Vielfalt an Salzen entsteht durch Reaktion von Baustoffkomponenten (Mörtel, Putz, Zement, Beton, Mauersteine, Ziegel, Anstrichstoffe etc.) mit hinzukommenden Lösungen.
Hydraulische Bindemittel reagieren basisch, sie sind durch Säuren angreifbar und auslaugbar. Es bilden sich neue Mineralphasen, die zu Treiberscheinungen, Salzkorrosionen und Ausblühungen führen. Bei engem Kontakt zu Naturwerksteinen gehen die Salze in deren Porenraum über und erzeugen dort Ausblühungen und Salzschäden.
In den Bindemittelmassen ist neben carbonatischem Anteil häufig Sulfat vorgegeben; bei den entstehenden Salzen handelt es sich denn auch vorwiegend um Sulfatsalze wie Gips, Thenardit, Mirabilit, Epsomit, Hexahydrat, Thaumassit, Ettringit ("Zementbazillus"), Monosulfat.
Die Kationen dieser Salze stammen aus den carbonatischen Anteilen der Bindemittel (Ca, Mg), aus Zuschlagstoffen (Ca, Mg, Na), aus Tausalzen (Na). Als Frostschutzmittel und Erstarrungsbeschleuniger können dem Beton und Mörtel NaCl, CaCl₂, Na₂SO₄, Na₂CO₃ u.a.m. zugemischt sein.
- Baustoffe und Naturwerksteine werden häufig mit Imprägnierungs- und Reinigungsmitteln behandelt. Wasserglas (Na₂O · nSiO₂ · xH₂O), Fluat (ZnSiF₆, MgSiF₆ u.a.), Alaune (KAl(SO₄)₂ · 12 H₂O u.a.) sondern ebenso wie Ätznatron (NaOH) oder Salmiak (NH₄Cl) salzbildende Ionen ab.

Die meisten in Mauerwerken feststellbaren Salzmineralien kommen in verschiedenen Hydratstufen vor. Sie verhalten sich zudem hygroskopisch: Wassermoleküle aus der Luft schlagen sich bei hoher Luftfeuchtigkeit an der Oberfläche eines Salzes nieder, es bildet sich eine gesättigte Lösung – das Salz zerfließt. Mit dem Einbau von Kristallwasser ist eine Volumenzunahme verbunden. Sie beträgt beispielsweise bei MgSO₄ · 7 H₂O (Epsomit) gegenüber MgSO₄ · 6 H₂O (Hexahydrat) das 1,13fache. Die stärkste Ausdehnung ist beim Übergang von Thenardit Na₂SO₄ zu Mirabilit Na₂SO₄ · 10 H₂O mit dem Faktor 4,12 zu beobachten, weshalb dieser Stoff beim Salzsprenge test nach DIN 52111 Verwendung findet.

Durch die Volumenzunahme können bei behinderter Ausdehnungsmöglichkeit Hydratationsdrücke bis zu mehreren 100 MN/m² entstehen, welche die Zugfestigkeiten der Gesteine bei weitem übersteigen. Die Drücke sind im allgemeinen um so größer, je geringer die Volumenzunahme beim Hydratationsvorgang ist. Betrachtet man die einzelnen Salze für sich, so nehmen die Hydratationsdrücke bei abnehmender Temperatur und ansteigender Luftfeuchtigkeit zu (Werte für Hydratationsdrücke in WINKLER 1975).

Die Entstehung der verschiedenen Hydratstufen, d.h. die Kristallwasseraufnahme bzw. -abgabe, regelt sich nach den vorliegenden Temperatur- und Feuchtigkeitsverhältnissen:

- Calciumsulfat kristallisiert aus reiner wässriger Lösung bei Temperaturen unterhalb von 66 °C stets als Gips, darüber auch als Anhydrit. Bei Gegenwart anderer Salze ist eine Abscheidung von Anhydrit auch bei tieferen

Temperaturen möglich. In Ausblühungssalzen wurde bislang jedoch kein Anhydrit nachgewiesen.

- Kochsalz kristallisiert bei Temperaturen unter -10°C zum Dihydrat $\text{NaCl} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Bei $+0,15^{\circ}\text{C}$ erfolgt die Umwandlung in NaCl (HOLLEMAN-WIBERG 1985, S. 938).
- Für reines Magnesium- und Natriumsulfat gelten unter Laborversuchsbedingungen folgende Temperaturbeständigkeitsbereiche (nach KOLLMANN 1978):
(Lösungsgenossen setzen die Umwandlungstemperatur allgemein herab; z.B. bildet sich bei Anwesenheit von Magnesium- oder Chlorid-Ionen Thenardit bereits bei 15°C)

Mg-Sulfat	1,8 - 48,3 $^{\circ}\text{C}$	Epsomit	$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$
	48,3 - 68 $^{\circ}\text{C}$	Hexahydrat	$\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
	über 68 $^{\circ}\text{C}$	Kieserit	$\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$
Na-Sulfat	1,5 - 32,4 $^{\circ}\text{C}$	Mirabilit	$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$
	über 32,4 $^{\circ}\text{C}$	Thenardit	Na_2SO_4

Werden die angegebenen Grenzen überschritten, so geben die Salze ihr Kristallwasser auch bei hoher relativer Luftfeuchtigkeit ab. Unterhalb der Umwandlungstemperaturen muß ein ausreichend hoher Wasserdampfpartialdruck vorhanden sein, damit die jeweiligen Hydratstufen verwirklicht sein können. So spalten manche Ausblühungssalze bei rel. Feuchten von 30 % und darunter Teile ihres Kristallwassers ab; zur Hydratation sind Feuchtigkeiten von 60 - 80 % (KOLLMANN 1978) ausreichend.

Die angegebenen Beispiele zeigen, daß Hydratations- und Dehydratationsvorgänge an Mauerwerkssalzen bei normalen atmosphärischen Bedingungen sehr häufig innerhalb eines Jahresverlaufes möglich sind. Abb. 16 in Abschnitt 5.5.1. zeigt, daß in München an sommerlichen Tagen im 24-Stunden-Verlauf mit je einem Dehydratations- und einem Hydratationsvorgang zu rechnen ist - zumindest was die oben angeführten Mg- und Na-Sulfate betrifft (vgl. auch ARNOLD 1976).

Die tatsächlichen Verhältnisse sind durch das häufige Vorhandensein mehrerer Salzarten weitaus komplizierter, als es durch einfache Laborversuche nachvollziehbar ist. Das durch Dehydratation einer Salzart freiwerdende Wasser bzw. das durch Hydratation der Lösung entzogene Wasser beeinflusst auch die anderen anwesenden Salze nach deren Löslichkeitsprodukten.

Nicht nur bei der Hydratation von Salzmineralien werden Druckkräfte erzeugt, sondern auch bei der Kristallisation der Salze aus der Lösung. 'Kristallisationsdrucke' entstehen, wenn der sich bildende Salzkristall zusammen mit der Restlösung ein größeres Volumen einnimmt als die übersättigte Lösung. Die Höhe des Kristallisationsdruckes steigt mit dem Grad der Übersättigung an (WINKLER 1975).

'Lineare Wachstumsdrucke' bauen sich in Richtung bestimmter kristallographischen Achsen auf. Obwohl die resultierenden Druckkräfte ausreichen würden, einen Gesteinsverband zu sprengen, hält SNETHLAGE (1984) die Bedeutung der Kristallisationsdrucke bei der Entstehung von Gesteinsschäden im Gegensatz zu den Hydratationsdrucke für gering, da sich durch die vielfältigen Möglichkeiten zur Auskristallisation im Porenraum keine übergroßen Drucke aufbauen dürften.

Nicht nur physikalisch durch Sprengdrucke, sondern auch chemisch durch verstärkte Lösung können sich Salze in Porenlösungen auf den Gesteinsverband auswirken. Höher konzentrierte Lösungen heben die Löslichkeit fremdioniger Stoffe an. Dagegen sinkt die Löslichkeit gleichioniger Stoffe, beispielsweise diejenige von CaSO_4 in Anwesenheit von CaCl_2 . Ein Beispiel aus MATTHESS (1961) zeigt

das System $\text{CaSO}_4 - \text{NaCl} - \text{H}_2\text{O}$ bei 20 °C:

g NaCl/100g H_2O	0	17,2	20,0	24,4	29,3
g CaSO_4 /100 g H_2O	0,204	0,79	0,82	0,82	0,61

Hohe Konzentrationen an Na^+ - und Cl^- -Ionen, wie sie nach Streusalzeinsatz im Schmelzwasser und möglicherweise noch höher konzentriert in der Porenlösung der davon durchnässten Gesteinsbereiche vorkommen, können demnach eine zusätzliche Lösungsaufnahme z.B. von Sulfat-Ionen bzw. eine verstärkte Lösung von carbonatischen Gesteinsmineralien zur Folge haben. Tatsächlich treten die massivsten Salzschäden an Gebäudefassaden im Bereich der mit Streusalz behandelten Treppenanlagen und Eingänge auf (vgl. Abschnitt 6.2.3.).

Gesteinsschäden durch Ausblühungssalze entstehen einerseits in Kapillarsaumbereichen, wo sich durch beständiges Verdunsten des Lösungsmittels erhöhte Salzgehalte einstellen, andererseits an Gesteinstteilen, bei denen bereits primär ein hohes Salzangebot zur Verfügung steht, etwa in Form von salzabsondernden Baustoffen oder von salzhaltigen Gesteinskrusten; stärkste Schäden dort, wo beide Voraussetzungen zusammentreffen.

5.6.3.3. Chemische Analysen von Niederschlagswässern

Zwischen 1981 und 1985 wurde eine Reihe von Regen- und Schneewasserproben im Stadtgebiet Münchens gesammelt und auf den Lösungsinhalt hin untersucht.

Die Probenahmedaten der Regenwasserproben sind in Tab. 33 aufgeführt, die dazugehörigen Analysenergebnisse in Tab. 34. Das Regenwasser ist erwartungsgemäß gering mineralisiert. Die pH-Werte liegen im Bereich des natürlichen, schwach kohlensäuren Niederschlagswassers (Proben R 3 und R 4) oder leicht darunter (R 1 und R 2). Sulfat ist nur in geringer Menge vorhanden. Auffällig sind die im Verhältnis recht hohen Gehalte der Stickstoffverbindungen Ammonium und Nitrat.

Die Schneeproben (Tab. 35; Analysenergebnisse in den Tabellen 36a, 36b und 36c) wurden teils während bzw. kurz nach einem Schneefall gewonnen (SCH 1 und SCH 5), teils einer bereits liegenden Schneedecke entnommen (SCH 2 - 4 und SCH 6 - 12). Bei den Proben SCH 13 - 15 handelt es sich um aufgetauten bzw. wiedervereisten Schneematsch, der stark verschmutzt und mit Ruß, Split und Streusalz durchsetzt war.

Die Proben SCH 6 - 12 wurden innerhalb weniger Stunden in verschiedenen Parkanlagen der Innenstadt gewonnen, um möglicherweise vorhandene lokale Unterschiede der lufthygienischen Situation im Lösungsinhalt des Schneesmelzwassers erkennen zu können. Auffällig unter diesen Proben ist aber lediglich der erhöhte NaCl-Gehalt in SCH 12 vom Straßenrand des stark befahrenen Thomas-Wimmer-Rings. Die übrigen, sauberen Schneeproben dieser Serie weisen alle mehr oder weniger den typischen Lösungsinhalt des normalen Niederschlagswassers auf.

Allgemein liegen die pH-Werte des sauberen Schnees z.T. unter 4,0, bei den Proben SCH 2, 3 und 4 aber auch deutlich über 7,0, im Extremfall bei 9,1. Nach den Äquivalentverhältnissen von Sulfat und Nitrat zu urteilen, dürften die niedrigen pH-Werte nicht durch Schwefelsäure, sondern vielmehr durch Salpetersäure verursacht sein und damit auf der Wirkung der Autoabgase beruhen.

Tab. 33: Probenahmen von Regenwasser in der Innenstadt Münchens

- R 1 07.06.82 - Hof des Institutes für Allgemeine und Angewandte Geologie, Luisenstraße
2. Wolkenbruch nach 1 Woche hochsommerlichen Wetters
- R 2 04.08.82 - Volkartstraße, München-Neuhausen
Starkregen; Probewasser über Vordach abgelaufen
- R 3 24.08.82 - Hof des Institutes für Allgemeine und Angewandte Geologie, Luisenstraße
Gewitterregen nach mehreren sehr trockenen Tagen
- R 4 16.06.81 - Hof des Institutes für Allgemeine und Angewandte Geologie, Luisenstraße
Starkregen

Tab. 34: Chemische Analysen des Lösungsinhaltes von 4 Regenwasserproben aus der Münchner Innenstadt (Proben R 1 - R 4)

	R 1			R 2			R 3			R 4		
	mg/l	mval/l	mval%	mg/l	mval/l	mval%	mg/l	mval/l	mval%	mg/l	mval/l	mval%
H ₃ O ⁺					0,01	2						
Ca ⁺⁺	1,0	0,05	15	6,0	0,30	45	1,0	0,05	28	2,0	0,10	21
Mg ⁺⁺	1,8	0,15	44	1,8	0,15	23	0,6	0,05	26	2,4	0,20	42
Na ⁺	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
K ⁺	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
NH ₄ ⁺	2,6	0,14	41	3,6	0,20	30	1,5	0,08	44	3,2	0,18	37
HCO ₃ ⁻	6,1	0,10	35	24,4	0,40	54	6,1	0,10	46	12,2	0,20	51
SO ₄ ⁼⁼	3,0	0,06	21	7,5	0,16	22	-	-	-	6,0	0,13	33
Cl ⁻	1,0	0,03	10	4,0	0,11	15	2,0	0,06	27	2,0	0,06	16
NO ₃ ⁻	5,7	0,09	31	4,4	0,07	9	4,0	0,06	27	-	-	-
NO ₂ ⁻	0,02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PO ₄ ⁼⁼⁼	0,25	0,01	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kationen		0,34	100		0,66	100		0,18	100		0,48	100
Anionen		0,29	100		0,74	100		0,22	100		0,39	100
rel. Fehler*		7,9%			-5,7%			-10,0%			10,3%	
N-Gehalt (als mg/l NO ₃ ⁻)	14,6			16,7			9,1			10,9		
Anteil der N-Verb.(Gew%)	38,8%			15,5%			36,2%			11,5%		
pH-Wert	5,3			4,95			5,85			5,9		
Leitfähigkeit (20 °C)	39,0 µS/cm			70,5 µS/cm			16,5 µS/cm			41,0 µS/cm		

* Der relative Fehler errechnet sich aus: $\frac{\text{Summe K} - \text{Summe A}}{\text{Summe K} + \text{Summe A}} \cdot 100\%$
 - nicht nachgewiesen
 / nicht bestimmt

Im stark verschmutzten Schneematsch (SCH 14 und SCH 15) finden sich darüber hinaus beachtliche Gehalte an Nitrit, die wohl zusammen mit den hohen Rußanteilen im Schmelzwasser der Fahrbahnen zu sehen sind.

Die Tauwässer (SCH 13 - 15) sind erwartungsgemäß stark angereichert mit Natriumchlorid. Auffallend hierbei sind die mit dem NaCl-Gehalt sprunghaft ansteigenden Calcium- und Sulfatgehalte. Offenbar liegen im Straßenstaub Gipspartikel bereit (vgl. die Analysen der Staubproben in Tab. 29), die in Anwesenheit von Natriumchlorid und anderen beigemengten Stoffen leicht in Lösung genommen werden können (vgl. 5.6.3.2.).

Tab. 35: Probenahmen von Schnee und Schneematsch in der Münchner Innenstadt

SCH 1	26.03.83 - Hof des Institutes für Allgemeine und Angewandte Geologie, Luisenstraße Schneefall bei Gewitter
SCH 2	07.03.84 - Alter Südfriedhof Sauberer Altschnee, obere Schicht
SCH 3	07.03.84 - Alter Südfriedhof Sauberer Altschnee, tiefere Schicht
SCH 4	07.03.84 - Alter Südfriedhof Sauberer Altschnee, obere Schicht
SCH 5	08.03.84 - Hof des Institutes für Allgemeine und Angewandte Geologie, Luisenstraße Neuschnee
SCH 6	03.01.85 - Parkanlage südlich des Friedensengels Wenige Tage alter, sauberer Schnee
SCH 7	03.01.85 - Parkanlage südlich des Maximilianeums Wenige Tage alter, sauberer Schnee
SCH 8	03.01.85 - Marienhof nördlich des Neuen Rathauses Wenige Tage alter, sauberer Schnee
SCH 9	03.01.85 - Parkanlage westlich der Matthäus-Kirche am Sendlinger-Tor-Platz Wenige Tage alter, sauberer Schnee
SCH 10	03.01.85 - Parkanlage südlich der Akademie der bildenden Künste Wenige Tage alter, sauberer Schnee
SCH 11	03.01.85 - Parkanlage westlich der Glyptothek, Königsplatz Wenige Tage alter, sauberer Schnee
SCH 12	03.01.85 - Grünstreifen am Thomas-Wimmer-Ring (Altstadt-Ring) zwischen Isartorplatz und Völkerkundemuseum Wenige Tage alter Schnee
SCH 13	Januar 85 - Bürgersteig Volkartstraße, München-Neuhausen Vereister und stark verschmutzter Altschnee
SCH 14	03.01.85 - Nußbaumstraße am Sendlinger-Tor-Platz Stark verschmutzter Schneematsch von der Fahrbahn
SCH 15	Januar 85 - Stark verschmutzter Schneematsch vom Kotflügel eines PKWs

	SCH 1			SCH 2			SCH 3			SCH 4			SCH 5		
	mg/l	mval/l	mval%	mg/l	mval/l	mval%	mg/l	mval/l	mval%	mg/l	mval/l	mval%	mg/l	mval/l	mval%
H ₃ O ⁺															
Ca ⁺⁺	1,0	0,05	38	5,0	0,25	83	3,0	0,15	71	5,0	0,25	81	1,0	0,05	13
Mg ⁺⁺	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,6	0,05	10
Na ⁺	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
K ⁺	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
NH ₄ ⁺	1,5	0,08	62	0,9	0,05	17	1,1	0,06	29	1,0	0,06	19	5,8	0,32	67
HCO ₃ ⁻	5,1	0,10	53	18,3	0,30	83	9,15	0,15	58	18,3	0,30	94	-	-	-
SO ₄ ⁻⁻⁻	-	-	-	1,0	0,02	6	3,0	0,06	23	-	-	-	8,0	0,17	38
Cl ⁻	1,0	0,03	16	1,0	0,03	8	1,0	0,03	11	-	-	-	5,0	0,14	31
NO ₃ ⁻	3,5	0,06	31	0,9	0,01	3	0,9	0,01	4	-	-	-	8,8	0,14	31
NO ₂ ⁻	0,1	-	-	0,07	-	-	0,03	-	-	0,02	-	-	0,04	-	-
PO ₄ ⁻⁻⁻⁻	0,05	-	-	0,02	-	-	0,34	0,01	4	0,71	0,02	6	0,08	-	-
Kationen		0,13	100		0,30	100		0,21	100		0,31	100		0,48	100
Anionen		0,19	100		0,36	100		0,26	100		0,32	100		0,45	100
rel. Fehler*		-18,8%			-9,1%			-10,6%			-1,6%			3,2%	
N-Gehalt (als mg/l NO ₃ ⁻)	8,7			4,1			4,7			3,4			28,6		
Anteil der N-Verb. (Gew%)	38,5%			6,9%			11,0%			4,1%			49,9%		
pH-Wert	5,9			7,85			7,4			9,1			4,2		
Leitfähigkeit (20° C)	18,5 µS/cm			30,2 µS/cm			30,7 µS/cm			28,2 µS/cm			85,0 µS/cm		

* Der relative Fehler errechnet sich aus: $\frac{\text{Summe K} - \text{Summe A}}{\text{Summe K} + \text{Summe A}} \cdot 100 \%$

- nicht nachgewiesen
/ nicht bestimmt

Tab. 36a: Chemische Analysen des Lösungsinhaltes von Schnee und Schneematsch aus der Münchner Innenstadt (Proben SCH 1 - SCH 5)

	SCH 6			SCH 7			SCH 8			SCH 9			SCH 10		
	mg/l	mval/l	mval%	mg/l	mval/l	mval%	mg/l	mval/l	mval%	mg/l	mval/l	mval%	mg/l	mval/l	mval%
H ₃ O ⁺		0,20	77		0,13	52		0,16	55		0,18	72		0,06	35
Ca ⁺⁺	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mg ⁺⁺	-	-	-	0,6	0,05	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Na ⁺	1,0	0,04	15	1,0	0,04	16	2,0	0,09	31	1,0	0,04	16	1,0	0,04	24
K ⁺	0,1	-	-	0,1	-	-	0,1	-	-	-	-	-	0,1	-	-
NH ₄ ⁺	0,4	0,02	8	0,5	0,03	12	0,77	0,04	14	0,5	0,03	12	1,3	0,07	41
HCO ₃ ⁻	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SO ₄ ⁻⁻⁻	2,0	0,04	22	1,0	0,02	11	1,0	0,02	10	3,0	0,06	29	1,0	0,02	12
Cl ⁻	1,0	0,03	17	1,0	0,03	17	2,0	0,06	32	1,0	0,03	14	1,0	0,03	18
NO ₃ ⁻	6,6	0,11	61	6,6	0,11	61	6,6	0,11	58	7,5	0,12	57	7,5	0,12	70
NO ₂ ⁻	0,02	-	-	0,01	-	-	-	-	-	-	-	-	0,03	-	-
PO ₄ ⁻⁻⁻	0,06	-	-	0,73	0,02	11	0,03	-	-	0,03	-	-	0,02	-	-
Kationen		0,26	100		0,25	100		0,29	100		0,25	100		0,17	100
Anionen		0,18	100		0,18	100		0,19	100		0,21	100		0,17	100
rel. Fehler*		18,2%			16,3%			20,8%			8,7%			0,0%	
N-Gehalt (als mg/l NO ₃ ⁻)	8,0			8,3			9,2						12,0		
Anteil der N-Verb. (Gew%)	62,8%			61,6%			59,0%			61,4%			73,9%		
pH-Wert		3,7			3,9			3,8			3,75			4,25	
Leitfähigkeit (20 °C)		26,5 µS/cm			20,0 µS/cm			25,5 µS/cm			26,0 µS/cm			19,0 µS/cm	

* Der relative Fehler errechnet sich aus: $\frac{\text{Summe K} - \text{Summe A}}{\text{Summe K} + \text{Summe A}} \cdot 100 \%$

- nicht nachgewiesen

Tab. 36b: Chemische Analysen des Lösungsinhaltes von Schnee und Schneematsch aus der Münchner Innenstadt (Proben SCH 6 - SCH 10)

	SCH 11			SCH 12			SCH 13			SCH 14			SCH 15		
	mg/l	mval/l	mval%	mg/l	mval/l	mval%	mg/l	mval/l	mval%	mg/l	mval/l	mval%	mg/l	mval/l	mval%
H ₃ O ⁺	-	0,06	21	1,0	0,05	2	58,1	2,90	7	69,1	3,45	2	62,1	3,10	1
Ca ⁺⁺	-	-	-	2,4	0,20	9	8,5	0,70	2	3,0	0,25	-	2,4	0,20	-
Mg ⁺⁺	1,2	0,10	34	48,0	2,09	88	860,0	37,39	89	4500,0	195,65	98	6600,0	286,96	99
Na ⁺	2,0	0,09	31	-	-	-	19,0	0,49	1	8,0	0,20	-	7,0	0,18	-
K ⁺	0,1	-	-	0,2	-	-	7,1	0,39	1	0,9	0,05	-	2,6	0,14	-
NH ₄ ⁺	0,65	0,04	14	0,6	0,03	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
HCO ₃ ⁻	3,1	0,05	24	6,1	0,10	5	131,2	2,15	5	67,1	1,10	-	58,0	0,95	-
SO ₄ ⁻⁻	1,0	0,02	10	2,0	0,04	2	47,0	0,98	2	75,0	1,56	1	100,0	2,08	1
Cl ⁻	1,0	0,03	14	69,0	1,94	88	1600,0	45,07	93	8300,0	233,80	99	12100,0	340,85	99
NO ₃ ⁻	6,6	0,11	52	6,6	0,11	5	1,8	0,03	-	5,5	0,09	-	10,6	0,17	-
NO ₂ ⁻	0,01	-	-	0,04	-	-	-	-	-	1,98	0,04	-	2,56	0,06	-
PO ₄ ⁻⁻⁻	0,02	-	-	0,05	-	-	0,1	-	-	0,05	-	-	0,04	-	-
Kationen		0,29	100		2,37	100		41,87	100		199,60	100		290,58	100
Anionen		0,21	100		2,19	100		48,23	100		236,59	100		344,11	100
rel. Fehler*		16,0%			3,9%			- 7,1%			- 8,5%			- 8,4%	
N-Gehalt (als mg/l NO ₃ ⁻)	8,8						26,0			11,2			22,9		
Anteil der N-Verb. (Gew%)	46,3%			5,3%			0,3%			0,06			0,08		
pH-Wert		4,25			5,8			6,75			8,15			8,55	
Leitfähigkeit (20 °C)		19,0 µS/cm		225 µS/cm			3 950 µS/cm			20 400 µS/cm			27 500 µS/cm		

* Der relative Fehler errechnet sich aus: $\frac{\text{Summe K} - \text{Summe A}}{\text{Summe K} + \text{Summe A}} \cdot 100\%$
 - nicht nachgewiesen

Tab. 36c: Chemische Analysen des Lösungsinhaltes von Schnee und Schneematsch aus der Münchner Innenstadt (Proben SCH 11 - SCH 15)

5.7. Organismen

5.7.1. Mikroorganismen

In der Literatur über Steinverwitterung wird der Wirkung von Mikroorganismen (Bakterien, Algen, Pilze, Flechten) eine gewisse Bedeutung beigemessen. Früher wurden die genannten Formen als Stämme der "niederen Pflanzen" zusammengefaßt. Heute wird diese Gliederung nicht mehr aufrechterhalten. Bakterien und Cyanobakterien (Blaualgen) stellen eine Urgruppe von Lebewesen dar, aus der wahrscheinlich alle höheren Organismen hervorgegangen sind. Die Pilze bilden nun neben den Tieren und dem Pflanzenreich ein eigenes Reich.

Die genannten Mikroorganismen sind allgegenwärtig vorhanden; sie lassen sich in der Luft, auf Gesteinsoberflächen und in den Porenräumen der Gesteine in natürlicher wie in städtischer Umgebung nachweisen. Man unterscheidet autotrophe Organismen, die Energie und Nährstoffe aus dem Licht der Sonnenstrahlung bzw. der Oxidation anorganischer Stoffe beziehen und heterotrophe Organismen, welche sich durch Umwandlung organischer Verbindungen ernähren.

Den Algen und den Flechten, letztere eine Symbiose zwischen autotrophen Algen und heterotrophen Pilzen, wird keine steinschädigende, eher sogar eine schützende Funktion zugeschrieben (KRUMBEIN 1966).

Flechten überziehen Oberflächen von Pflanzen- und Gesteinstteilen. Manche Arten gedeihen nur in einer Atmosphäre, die von Luftschadstoffen weitgehend frei ist. In der Münchner Innenstadt werden seit 1891 regelmäßig Flechtenkartierungen an Bäumen durchgeführt. In Berichten der Bayerischen Botanischen Gesellschaft von 1891 bis 1902 wurde das Fehlen von Flechten in Gebieten der Münchner Innenstadt bereits mit dem steigenden Verbrauch von Stein- und Braunkohle in Verbindung gebracht. 1956 nahm die "Flechtenwüste" nahezu das gesamte Stadtgebiet innerhalb des Mittleren Rings ein. Inzwischen wurden die Schwefeldioxid-Immissionen kontinuierlich gesenkt, und tatsächlich konnten 1968 erste Flechtenanflüge wieder an Bäumen der Innenstadt entdeckt werden. Heute siedelt bereits eine ganze Anzahl verschiedener Flechtenarten an den innerstädtischen Bäumen (Süddeutsche Zeitung vom 15.03.1984).

Autotrophe und heterotrophe Bakterien und Pilze erzeugen innerhalb ihres Stoffwechsels mineralische Säuren, wie z.B. Salpetersäure oder Schwefelsäure, sowie eine Vielzahl organischer Säuren (Ameisensäure, Essigsäure, Buttersäure, Oxalsäure, Milchsäure, Zitronensäure u.a.m.). Die Säuren können durch ihre Acidität korrodierend auf Carbonatgesteine wirken, darüber hinaus vermögen sie nachgewiesenermaßen die in silikatischen Mineralien gebundenen Kationen komplex in Lösung zu bringen (ECKHARDT 1978).

Umstritten ist jedoch das Ausmaß dieser Wirkungen an der Gesteinsverwitterung. Elektronenmikroskopische Aufnahmen von verwitterten Gesteinsproben aus Münchner Friedhöfen zeigen häufig eine Besiedlung durch Algen, Bakterien Schleime und Pilzhyphen, Proben aus rein städtischem Milieu in München dagegen nie. Mit Sicherheit sind hier im angewetzten Luftstaub auch Sporen und Bakterien enthalten. In städtisch exponiert gewesenen Werksteinproben können nach Bebrütung im Labor höchste Keimzahlen festgestellt werden (KRUMBEIN 1973). Da Bakterien und Pilze zur Entfaltung ihrer Lebenstätigkeit neben einem gewissen Nährstoffangebot auch ausreichend Feuchtigkeit benötigen (ECKHARDT 1983), sind die Keime und Sporen dieser Mikroorganismen auf den meistenteils ausgetrockneten Gebäudefassaden wohl als inaktiv zu betrachten.

5.7.2. Höhere Pflanzen

Die Anwesenheit von Bäumen und Sträuchern in Alleen, Gärten, Parks und Friedhöfen ruft durch Beschattung, durch Ausgleich des Feuchtigkeitshaushaltes, durch Absorption von schädlichen Gasen und Staubpartikeln vielfältige, im einzelnen schwer konkretisierbare Beeinflussungen des für die Bausteinverwitterung maßgeblichen lokalen Kleinklimas hervor.

Gräser, Sträucher und Bäume treiben ihre Wurzeln in Fugen, Risse und Hohlräume von Gesteinsbauteilen hinein. Bestimmte Pflanzenwurzeln vermögen kalklösende Säuren abzuscheiden. In der freien Natur findet man nicht selten auf diese Art angeätzte Kalksteine vor. An den Werksteinbauten einer Stadt ist allerdings kaum die Gelegenheit und die Notwendigkeit einer solch dichten Durchwurzelung gegeben.

Die Turgorbewegungen von Pflanzenteilen, durch die sich Drucke bis $1,5 \text{ MN/m}^2$ aufbauen können (WUNDERLICH 1968), wären allein in der Lage, größere Gesteinsquader von ihrer Stelle zu bewegen. Die meisten Verschiebungen und Verkippungen von Werksteinen durch Pflanzeneinwirkung gehen aber auf das allmähliche Dickenwachstum von Wurzeln und Stämmen zurück.

Manche Denkmäler und Gebäude sind von Efeu, manche sogar von Weinranken überwachsen. Von Baubiologen wird gern auf die schützende Wirkung einer Pflanzenbedeckung für die Hausfassaden hingewiesen. Tatsächlich wurden bisher keine schädigenden Einflüsse durch einen Efeubewuchs beobachtet. Selbst an Carbonatgesteinen treten an den Anheftungspunkten keine Ätzspuren auf.

Auch Moose gehören zu den höheren Pflanzen. Ihr Gedeihen ist an Situationen gebunden, in denen zumindest zeitweise Wasser in ausreichender Menge zu ihrer Fortpflanzung vorhanden ist (beschattete Bauteile; Brunnenbecken; Gartenmauern; in Wasserpflützen stehende Sockelquader; Mauerfugen, durch die Wasser sickert und an denen sich auch Kalksinterkrusten abscheiden). Die Moospflanzen speichern das ihnen angebotene Wasser und tragen anscheinend aktiv zur Vermulmung von Carbonatgesteinen, insbesondere von Muschelkalk und Kalktuff, in deren größeren Porenräumen sie gerne siedeln, bei.

Mit dem Luftstaub zusammen lagern sich zahlreiche, meist erst unter dem Mikroskop erkennbare, pflanzliche Partikel wie Sporen, Pollen, Blütenstaub und Samenkörner auf den Gesteinsflächen ab. Im Herbst kann man die Beobachtung machen, daß von abgefallenem Laub rostbraune Verfärbungen auf Gesteinen ausgehen, die in der Folgezeit aber leicht wieder ausgewaschen werden.

5.7.3. Tiere

Von den unzähligen existierenden Tierarten kommen in einer heutigen, mitteleuropäischen Stadt nur sehr wenige mit den dort verbauten Werksteinen in Berührung. Zu nennen sind: Gliederfüßler (vor allem Insekten und Spinnen), Vögel (vorwiegend Tauben), von den Säugetieren die Hunde, früher auch Pferde, und schließlich der Mensch, dessen Beitrag zur Verwitterung unter 5.10. ein eigener Abschnitt gewidmet ist.

Bei der mikroskopischen Betrachtung von verschmutzten und verkrusteten, in geschützter Lage exponiert gewesenen Gesteinsstücken lassen sich neben mineralischen und pflanzlichen Staubpartikeln immer auch Hinterlassenschaften von Insekten und Spinnen finden, wie Spinnfäden, Spinn-Kokons, Insekteneier, abgestoßene Chitinpanzer, Flügelteile etc. sowie bei ganz frisch gewonnenen Proben auch die Gliederfüßler selbst. Die Organismen bewohnen gern bereits gelockerte Gesteinspartien wie Schalenabplatzungen, Abgrusungen, Staubaufwehungen etc.; eine schädigende Wirkung auf die Gesteine ist nicht zu erkennen.

Tauben und Hunde (früher auch Pferde und vor der Kanalisation der Stadt die Menschen), haben unmittelbar Einfluß auf die Verwitterung durch die Stoffgehalte ihrer Exkremente. In den flüssigen Ausscheidungen der Vögel und Säugetiere sind vor allem Ungesättigte Stickstoffverbindungen Harnstoff ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$) und Harnsäure ($\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6\text{N}_4$) enthalten, in geringerer Menge Kochsalz und je nach der Art der aufgenommenen Nahrung in unterschiedlichem Maß Phosphate, Sulfate, Carbonate und Ammoniumverbindungen. Diese Stoffe reichern das kapillar in die Gesteine eindringende Wasser mit Salzkationen an und tragen so zur Entstehung von Ausblühungen und Salzschäden mit bei. In Viehställen entsteht an jauchedurchtränkten Mauern Calciumnitrat ("Kalksalpeter").

KRUMHOLTZ (1962) stellte außer der sichtbaren Verschmutzung der Gesteine durch Taubenkot keine direkt erfolgenden Schädigungen fest. Er spricht allerdings von einer indirekten Wirkung, da Blechabdeckungen von Bauteilen durch die oxidierend wirkende Salpetersäure leicht korrodiert und durchlöchert werden. Regennässe dringt dann in die Bauteile ein und führt zu Folgeschäden. KROMBEIN (1966) konnte einen Einfluß von Taubenkot auf die Verwitterung von Gesteinen weder biologisch noch chemisch nachweisen.

An sehr vielen Stellen von Gebäudesockeln befinden sich 'Hundeklos'. Sie entstehen bevorzugt an 'baumnahen' Situationen wie Ecken, Vorsprüngen, Pfeilern. Da die Hunde durch die Anlage der 'Klos' soziale Kontakte pflegen, bilden sich im Laufe der Zeit an den einmal angelegten Stellen zusammen mit dem anhaftenden Straßenschmutz ausgeprägte, grau-blaue Verschmutzungen aus. Auch hier sind direkt einsetzende Steinschäden kaum zu erkennen. Selbst Salzausblühungen sind selten zu beobachten und von unbedeutendem Ausmaß. Die ausgeschleuderten Salze können aber auf dem Umweg über die Regennässe kapillar in die Baustoffe gelangen und mit anderen Salzen zusammen die Entwicklung von Ausblühungen und Salzschäden vorantreiben (HEROLD 1976).

5.8. Schwerkraft

Die Schwerkraft wird allgemein nicht als ein eigener Verwitterungsfaktor abgehandelt. Eine Reihe von Verwitterungsvorgängen wird jedoch wesentlich durch die Wirkung der Schwerkraft geprägt.

Werksteine besitzen Druckfestigkeiten zwischen etwa 20 (Travertin) und 300 (Diorit, Gabbro, Quarzit) MN/m^2 . Sie sind damit in der Lage, sehr hohe Lasten aufzunehmen, vorausgesetzt, der Untergrund ist in gleicher Weise und gleichmäßig belastbar. Bruchschäden durch zu hohe Auflast entstehen deshalb dort, wo diese Bedingungen nicht gegeben sind und die Gesteine auf die wesentlich geringere Biegezugfestigkeit hin beansprucht werden: An Denkmalsockeln und Treppentufen, die auf Erdbreich verlegt sind, an Grabsteinsockeln über Grabkammern, an frei tragenden oder überstehenden Stufenplatten.

Bruchschäden an Fassadenverkleidungen sind häufig auf Gebäudesetzungen zurückzuführen, die ebenfalls durch nachgebenden Untergrund verursacht werden.

Manche Carbonatgesteine, besonders Marmore, neigen unter dem Einfluß der Schwerkraft zu Verbiegungen. Hiervon sind vornehmlich dünne und fest eingespannte Werksteine betroffen: Fassadenplatten und Schrifttafeln, aber auch überstehende Steinteile, wie z.B. Grabkreuzbalken o.ä.

Schließlich bewirkt die Schwerkraft die Ablagerung von Staub auf den horizontalen Bauteilflächen, die Abspülung der Fassadenflächen durch das ablaufende Regenwasser mit den Erscheinungen des Stauwassers und der rauen Abwitterung sowie der Herausbildung regenablaufgeschützter, verschmutzter und verkrusteter Bereiche.

5.9. Zeit

Der sog. "Faktor Zeit" wird in der Regel so verstanden, daß die meisten Verwitterungsprozesse erst nach einer ausreichend langen Einwirkungsdauer auf ein Gestein zu sichtbaren Verwitterungserscheinungen führen.

Bei den natürlich ablaufenden, großräumig wirksamen Verwitterungsvorgängen, die zu Verkarstung, zur Bildung von Verwitterungsschutt, zur Entstehung von Bodenhorizonten etc. führen können, stehen Millionen von Jahren zur Verfügung. Die maßgeblichen Einflußfaktoren sind diejenigen, die auch das über lange Zeit bestehende 'Klima' bestimmen, im wesentlichen die mittleren Temperaturen, die mittleren Verhältnisse des Niederschlages und der Bewölkung sowie die Art der Vegetationsbedeckung.

Bei der Werksteinverwitterung sind dagegen ganz andere Zeitdimensionen zu betrachten. Die ältesten Steinbauwerke der Megalithkulturen und auch die ältesten Werksteinbauten, welche im Nahen Osten in günstigem Klima bis heute überdauert haben, sind nur knapp 5000 Jahre alt. In München entstammt der größte Teil der zur Zeit verwitternden Fassaden gar erst den Jahren nach dem 2. Weltkrieg, ist also keine 50 Jahre alt. Werkstücke, die vor mehr als 100 Jahren im Außenbereich verbaut und nicht durch Renovierung oder Ersatz verändert wurden, stellen eine Seltenheit dar.

Das allgemeine Großklima stellt lediglich den Rahmen dar für die Wirkungen der vielen, an der Werksteinverwitterung beteiligten Prozesse. Entscheidend sind aber die kurzzeitigen, täglichen und jahreszeitlichen, Schwankungen der einzelnen Einflüsse sowie auch in starkem Maße die Differenzierungen des Ortes.

Die meisten Verwitterungsfaktoren verhalten sich in ihrem Auftreten und in ihrer Intensität zeitvariabel. Dazu gehören insbesondere die Einflüsse des Wetters (Temperatur, Strahlung, Luftfeuchtigkeit, Niederschlagsereignisse) und diejenigen der Immissionsbelastungen der Luft mit ihren stündlichen, täglichen und jahreszeitlichen Schwankungen.

Als zeitkonstante Faktoren können die Materialeigenschaften der Gesteine und Baustoffe, die Situierung der Werkstücke am Bauwerk sowie die Gegebenheiten des Baugrundes angesehen werden. Im Laufe der Expositionsdauer treten allerdings auch hier zeitliche Variationen ein, etwa wenn sich die Materialeigenschaften durch Verwitterungsvorgänge verändern oder wenn in das Umfeld der Werksteine durch Baumaßnahmen o.ä. eingegriffen wird.

Viele Schadensprozesse kommen erst durch das zeitliche Zusammentreffen von zwei oder mehreren kritischen Größen von Einzelfaktoren in Gang. Die Schadstoffbelastung der Luft kann erst in Verbindung mit einer gewissen Mindestfeuchtigkeit im Gesteinsporenraum wirksam werden; Frostschäden treten ein, wenn mit den Frosttemperaturen gleichzeitig eine Wassersättigung des frostempfindlichen Gesteins einhergeht u.s.f.

In der modernen Zeit ist das die Verwitterungsvorgänge prägende Umfeld einem mitunter raschen zeitlichen Wandel unterworfen (vgl. Abschnitt 5.10.1.).

Die Schadstoffbelastung der Umwelt wandelt sich quantitativ wie qualitativ mit den industriellen und gesellschaftlichen Veränderungen. Moden der Bautechnik und des Zeitgeschmacks gestalten die Ausgangsbedingungen für die Verwitterung frisch verbauter Gesteine jeweils neu. Schließlich können gesetzliche, steuer- und versicherungsrechtliche Vorgaben bestimmte Verhaltensweisen, Bau- und Renovierungsmaßnahmen provozieren oder unterdrücken, was wiederum auf die Abläufe des Verwitterungsgeschehens zurückwirken kann (Verpflichtung zum Salzen glatter Fahrbahnen und Gehsteige; Verbot des Einsatzes von Streusalz; steuerliche Begünstigungen von Renovierungsmaßnahmen; Einschränkung der Emissionen u.s.f.).

5.10. Anthropogene Einflüsse

Ohne die Tätigkeit des Menschen gäbe es keine Steinbauten und keine Stein-
denkmäler, deren Verwitterung in städtischer Luft ein Problem darstellen
könnte. Gesteine werden aus dem Schutz ihrer natürlichen Umgebung entfernt,
zu handlichen Werkstücken verarbeitet und während der Zeit ihrer Exposition
am Bauwerk vielfältigen mechanischen und chemischen Angriffen ausgesetzt. -
So gesehen ist das gesamte Verwitterungsgeschehen an Werksteinen anthropogen
provoziert.

Bei unseren Betrachtungen nimmt man jedoch die Existenz von Bauwerken als ge-
geben hin und versucht, die von außen angreifenden und die der Bauwerksitua-
tion innewohnenden Verwitterungseinflüsse in natürlich und anthropogen be-
dingte zu trennen. Verwitterungsprädispositionen durch Gewinnung, Verarbei-
tung und Verbau der Werkstücke werden meist nur in so weit berücksichtigt,
als daraus spätere Schäden direkt abzuleiten sind.

5.10.1. Mittelbare anthropogene Einflüsse

Als mittelbar die Verwitterung fördernde anthropogene Einflüsse sollen Prä-
gungen des Werksteinumfeldes angesehen werden, deren Ursachen im wesentlichen
aus den Folgen menschlicher Tätigkeit erwachsen und deren Wirkungen auf die
Steinsubstanz zu Verwitterungserscheinungen führen können. Im Gegensatz zu
den meisten natürlichen Verwitterungsfaktoren sind das Auftreten und
die Intensität der mittelbar anthropogen erzeugten Einflüsse weitgehend
zeitbedingt und dem geschichtlichen Wandel unterworfen. Gipskrustenbildungen
sowie die Zerstörungen an carbonatisch gebundenen Sandsteinen wurden erst mög-
lich durch angestiegene SO₂-Immissionen. Andererseits ist es vorstellbar, daß
heute auffallende Verwitterungserscheinungen von früheren, anthropogen indu-
zierten Belastungen herrühren, für die es mittlerweile keine Entsprechungen
mehr gibt.

5.10.1.1. Stadtklima

Mit der Bezeichnung "Stadtklima" ist ein Begriff gegeben, der die Summe der
anthropogenen Einflüsse auf das Wettergeschehen dicht besiedelter Räume zu
erfassen sucht. DITTMANN (1982) sieht das Stadtklima als ein 'Mesoklima' an,
das in komplexer Weise vermittelt zwischen dem großräumig herrschenden Makro-
klima und den vielen, den Stadtraum erfüllenden Mikroklimaten. Das wesentliche
Merkmal des Stadtklimas ist nach DITTMANN die Ausbildung einer "mehrkernigen
städtischen Wärmeinsel". Die Ursachen für die Erwärmung sind vielfältig:

- Besonnung der Gebäudefassaden;
- höhere Strahlungsabsorption der Fassadenflächen gegenüber dem Frei-
land;
- Wärmespeicherung durch die Baustoffe;
- verminderter Wärmeverlust durch unterdrückte Verdunstung (kanali-
sierte Niederschläge; trockene Fassaden);
- anthropogene Wärmezufuhr, besonders im Winter;
- Glashauseffekt durch CO₂-Immissionen.

Weitere Merkmale des Stadtklimas sind nach DITTMANN:

- Eine - reduzierte relative Luftfeuchtigkeit (durch Überwärmung,
Kanalisierung der Niederschläge, fehlende Grünflächen);
- dabei - vermehrte Nebelbildung (durch hygroskopische Aerosole, ge-
steigerte Luftturbulenz und Konvektion);
- und - besondere Luftströmungsverhältnisse (mit im allgemeinen re-
duzierten Windgeschwindigkeiten in den unteren Luftschichten,

hervorgerufen durch die Reibungseinflüsse der Bebauung, und mit örtlichen Wirbelbildungen in engen Straßen und auf den Leeseiten hoher Gebäude).

In GLOBAL 2000 (1980) werden folgende Zahlenwerte der Klimaveränderungen in städtischen Bereichen im Vergleich zu ländlichen Gegenden aufgeführt:

Tab. 37: Typische durch Verstädterung verursachte Klimaveränderungen (nach GLOBAL 2000, 1980, S. 568)

	im Vergleich zu ländlichen Gegenden
Temperatur	0,5 - 3,0 °C höher
Rel. Feuchte	2 - 8 % niedriger
Staubteilchen	10 mal mehr
Bewölkung	5 - 10 % stärker
Nebel	30- 100 % häufiger
Einstrahlung	15 - 20 % geringer
Windgeschwindigkeit	10 - 30 % niedriger
Windstille	5 - 10 % häufiger
Niederschläge	5 - 10 % mehr

5.10.1.2. Industrialisierung

Bei der Verbrennung fossiler organogener Energieträger wie Braunkohle, Steinkohle, Erdgas und Erdöl, aber auch bei der Müllverbrennung, werden Schadstoffe freigesetzt (vgl. Tab. 31, Abschnitt 5.6.2.), die erheblichen Einfluß auf die Werksteinverwitterung nehmen können (Abschnitte 5.6.2. und 5.6.3.). In Mitteleuropa setzte die intensive Nutzung fossiler Brennstoffe mit Beginn der Industrialisierung ein und hat seither bis vor etwa einem Jahrzehnt beständig zugenommen. Neben dem Ausstoß von Ruß und sonstigen Staubpartikeln sowie von Stickstoffgasen sind für die Werksteinverwitterung von besonderem Interesse die Emissionen von SO₂.

Die pflanzliche Substanz von Holz und Torf besteht hauptsächlich aus Zellulose und Lignin. Zu 5-10 % sind Eiweißstoffe enthalten, an die in sehr geringer und für die SO₂-Emission vernachlässigbarer Menge Schwefel chemisch angelagert ist. In der entstehenden Kohle bildet sich daraus Eisensulfid (Pyrit und Markasit), dessen Gehalt bei der Inkohlung relativ und bei paralischen Kohlen durch Aufnahme von Schwefelverbindungen aus dem Meerwasser auch absolut angereichert wird. Rheinische Braunkohle enthält im Mittel 0,4 Gew.-% S, Steinkohlen und Anthrazit des Ruhrkarbons im Mittel etwa 0,75 Gew.-% S (nach JÜNTGEN & V.HECK, 1981; in wasser- und aschefreier Substanz). Im einzelnen weisen Stein- und Braunkohlen Schwefelgehalte zwischen 0,5 und 2, maximal bis 4 Gew.-% auf.

Handelsübliches Heizöl besitzt dagegen Schwefelgehalte bis zu 0,3 Gew.-%, Erdgas 0,0004 %, Dieselmotortreibstoff 0,3 %, Benzin ca. 0,004 Gew.-% S (ENZYKLOPADIE 1981).

Eine direkte Rekonstruktion der lufthygienischen Verhältnisse in der Vergangenheit erscheint aufgrund fehlender Messungen und aufgrund des raschen qualitativen wie quantitativen Wandels des Energieeinsatzes kaum möglich. Die folgenden Anmerkungen zur industriellen und technischen Geschichte Bayerns und speziell Münchens sollen zumindest Hinweise geben auf das zeitliche Einsetzen bestimmter Energienutzungsformen und deren ungefähre Bedeutung für die Schadstoffemissionen.

Bis zur Mitte des letzten Jahrhunderts hatte die technische Industrialisierung auch in Bayern Einzug gehalten. Die Mechanisierung der Arbeitswelt ging von England aus, wo bereits seit dem 17. Jahrhundert Dampfmaschinen entwickelt worden waren, deren Prinzip durch die Patente von James WATT 1769 wesentlich verbessert und so einer wirtschaftlichen Nutzung zugeführt werden konnte.

Ein wichtiger Faktor bei der Industrialisierung Englands war der Umstand, daß dort bereits früh Steinkohle in großem Umfang zu Heizzwecken verfeuert wurde. Schon im 13. Jahrhundert ersetzte in London die billigere Steinkohle ("sea coal" aus Newcastle) weitgehend den Einsatz von Brennholz und Holzkohle. In zeitgenössischen Berichten von 1661, 1683 und 1700 (wiedergegeben in NIESEL 1979) wurde bereits deutlich der Zusammenhang von Gebäudeschäden in London mit den der Kohle entstammenden Rauchgasen erkannt. Die ersten Dampfmaschinen erwiesen sich zudem als rechte "Kohlenfresser"; eine Feststellung aus dem 18. Jh. lautete: "Wer sich eine Dampfmaschine leistet, der braucht ein Erzbergwerk, um sie zu bauen und ein Kohlebergwerk, um sie zu betreiben" (C. GRIMM 1985).

Um 1800 war die bayerische Wirtschaftsstruktur noch weitestgehend von der Landwirtschaft geprägt. Kraft- und Arbeitsmaschinen wurden mit Wasser- und Windkraft betrieben; die zum Kochen und Heizen benötigte Wärme wurde durch Verbrennen von Holz, Holzkohle und Torf gewonnen. Lediglich in der engeren Umgebung von Kohlelagern wurden diese hochwertigen Brennstoffe intensiver genutzt. Der Bergbau auf die oberbayerischen Pechkohlen von Peiting und Peißenberg ist seit dem ausgehenden 16. Jh. nachgewiesen; die gewonnenen Kohlen wurden zu einem großen Teil für den Hausbrand und die Ziegelherstellung nach Augsburg verkauft. Die ersten Braunkohlengruben in der Oberpfalz entstanden im 18. Jh. bei Schirnding und Marktredwitz, etwa zur gleichen Zeit wurde der Steinkohleabbau von Stockheim in Oberfranken aufgenommen.

In Bayern setzte die Industrialisierung zögernd ein, sie blieb hier trotz großer Begeisterung von Seiten des Staates und des privaten Unternehmertums und trotz bahnbrechender Erfindungen und Entwicklungen quantitativ immer hinter den Zentren des Ruhrgebietes, Sachsens und Schlesiens zurück. Vorreiter der technischen Entwicklung waren zunächst die Städte Augsburg und Nürnberg. München, als Haupt- und Residenzstadt, brauchte zuerst administrative Stimulationen, wie sie z.B. die Gründung der Bayerischen Hypotheken- und Wechselbank 1834 darstellte, um mit Augsburg und Nürnberg gleichziehen zu können.

Fortwährend entstand in München im 19. Jh. und bis zum 1. Weltkrieg eine Reihe von modernen, energieintensiven und teils bis heute existierenden Industriebetrieben (Tab. 38).

Bereits 1803 hatte Georg von REICHENBACH den Betrieb der großen Talerpresse in der Münze von München mittels Dampfkraft initiiert. Aber erst ab 1824 hielt die Dampfmaschine allgemein Einzug in die bayerischen Gewerbebetriebe.

Vor der Industrialisierung nahm die Holzwirtschaft einen sehr großen Anteil am gesamten Wirtschaftswesen ein. Gegen Ende des 18. Jahrhunderts schien eine Erschöpfung der Holzreserven absehbar zu sein. Infolge der ständigen Bevölkerungszunahme seit dem Mittelalter wuchsen die Ackerflächen und schwanden die Holzbestände, gleichzeitig wurden immer größere Mengen an Nutz- und Brennholz benötigt. In der Umgebung größerer Ansiedlungen kam es zu Holzverknappungen und ortsweise zu echter Holznot. Erst die allmähliche Erschließung weiterer Pechkohlenvorkommen in Oberbayern (1830-40: Penzberg; etwas später: Miesbach und Hausham) und der Anschluß der Abbaue an das Bahnliniennetz 1861-1875 sorgten für eine gesicherte Energieversorgung der aufstrebenden Industrien.

Tab. 38: Gründungsdaten einiger wichtiger in München entstandener Industriebetriebe (nach MEGELE 1951)

1823	Chemische Werke Bärlocher
1837	Lokomotivfabrik Maffei
1842	Lodenfabrik Frey
1852	Waggonfabrik Rathgeber
1865	Optische Werke Steinheil & Söhne
1866, 1872	Lokomotivfabrik Krauss
1871	Gummiwerke Metzeler
1872	Eisenwerke Kustermann
1890	Papierfabrik Freimann
1897	Flugzeugwerke Otto
1898	Präzisionsmechanik und Maschinenbau Deckel
1899	Eisenwerke München
1906	Treibriemen- und Lederfabrik Schmidt
1909	Zigarettenfabrik Zuban
1911, 1914, und 1916	Bayerische Motorenwerke
1913	Karosseriewerk Beißbarth
1913	Kupfer- und Messingwerk Moosach
1916	Bayerische Geschützwerke

daneben Faß- und Lederfabriken, Farbenwerke, Lagerhäuser und Transportunternehmen.

Die Ablösung der regenerierbaren Energien: Wasser, Wind und Holz durch fossile Brennstoffe erfolgte langsam und allmählich. Die Flößerei auf der Isar, deren Haupttransportgut nach wie vor Nutz- und Brennholz war, hatte ihren Höhepunkt überhaupt erst zwischen 1860 und 1876 und ging zu Anfang unseres Jahrhunderts erst entscheidend zurück (PLESSEN 1983).

Beim Betrieb der von München aus verkehrenden Eisenbahnen dauerte es bis in die 70er Jahre hinein, bis sich die Kohle als ausschließliches Feuerungsmaterial durchgesetzt hatte. Die erste, von München ausgehende Bahnlinie, die zunächst privat unterhaltene Strecke München - Augsburg, wurde 1840 eröffnet. Nach der probeweisen Verwendung von Torf, englischem Koks, bayerischer Braunkohle und böhmischer Steinkohle entschied man sich zunächst für eine reine Holzfeuerung (MARGGRAF 1894). 1845 wurden auf der inzwischen staatlich übernommenen Bahnlinie Versuche zur Torffeuerung durchgeführt. 1847 erschloß man für den Unterhalt der Staatsbahnen das Haspelmoor, das in den folgenden Jahrzehnten zusammen mit dem Kolbermoor und einigen anderen Torfabbauen einen Großteil des Brennstoffes für die südbayerischen Eisenbahnen lieferte. Bis 1871 stieg der Torfverbrauch für die Bahnen kontinuierlich an. Danach wurde die Preßtorfherstellung zunehmend unrentabel. Sie wurde um 1876 in den meisten Abbauen eingestellt. Inzwischen waren günstigere Transportmöglichkeiten für Importkohlen und für die Pechkohlen der neu erschlossenen oberbayerischen Vorkommen geschaffen worden.

In Nordbayern dagegen versorgte sich die Bahn von Beginn an mit importierten Kohlen. Bis 1856 war es vorwiegend aus England stammender Koks, der danach durch die kostengünstigere sächsische Steinkohle ersetzt wurde. Dazu kamen ab 1858 die den höchsten Brennwert besitzenden Ruhrkohlen, 1860 mit der Eröffnung der Linie Salzburg - Rosenheim (Anschluß nach München: 1871) die billigere Traunthaler Braunkohle und ab 1875 zunehmend böhmische Steinkohle.

5.10.1.3. Öffentliche Energieversorgung

1848 leitete die Stadtgemeinde München mit dem "Ersten Gasbeleuchtungsvertrag" den Bau von Gaswerken für den öffentlichen und privaten Verbrauch ein. Das I. Gaswerk entstand 1850 in der Thalkirchener Straße und wurde bis 1910 mit Kohle betrieben. Hinzu kamen 1883 das II. Gaswerk in Steinhausen, das 1939 abgerissen wurde und 1909 das III. Gaswerk in Moosach, das nach dem 2. Weltkrieg in den 50er Jahren nochmals in Betrieb genommen wurde. Noch 1959 existierten neben den über 15 000 elektrischen Straßenlampen 733 Gaslaternen im Stadtgebiet (MEGELE 1960).

Inzwischen gehört die Gaserzeugung aus Kohle der Vergangenheit an; an ihre Stelle ist die Nutzung des umweltfreundlichen Erdgases getreten. Seit 1957 konnte die Stadt München von den neu erschlossenen oberbayerischen Erdgasvorkommen zwischen München und dem Chiemsee profitieren. 1972 wurde auch norddeutsch-niederländisches Erdgas und seit 1973 in großem Umfang sowjetisches Erdgas bezogen. 1984 setzte sich die verbrauchte Gasmenge zu 90 % aus Importgas und nur noch zu 10 % aus heimischem Erdgas aus den allmählich versiegenden bayerischen Vorkommen zusammen.

Ab 1880 wurde die allgemeine Elektrifizierung Bayerns und damit die sog. "Zweite Technische Revolution" eingeleitet. Kraftwerke entstanden, die mit Wasserkraft und Verbrennungsenergie arbeiteten. Die erste, über eine längere Strecke erfolgende Übertragung elektrischer Energie (Gleichstrom) wurde anlässlich der Internationalen Elektrizitätsausstellung im Glaspalast Münchens 1882 von einer Dampfmaschine der Oberbayerischen Kohlebergwerke in Miesbach aus unternommen.

Erste Elektrizitätswerke in München entstanden 1891 (Westenriederstraße), 1893 (Muffatwerke, Zweibrückenstraße), 1894 (Bundesbahnkraftwerk, Donnersbergerstraße), 1895 (Maximilianswerk) und 1899 (Städtisches Elektrizitätswerk, Isartalstraße). Bis 1924 kamen weitere 5 E-Werke hinzu. Der erzeugte Strom wurde zur Beleuchtung, zum Maschinenbetrieb und zum Antrieb von Straßenbahnen benutzt (seit 1861 fuhren Pferdeomnibusse in München, seit 1876 Pferdeschienenbahnen, seit 1888 Dampftrambahnen und seit 1896 elektrische Straßenbahnen (MEGELE 1951)).

Schon bald verband man die Stromerzeugung mit der Ausnutzung der anfallenden Wärme. Das erste Heizkraftwerk der Stadt ("Schwabing") wurde 1908 eingerichtet. Weitere Fernheizwerke entstanden 1933/37 in der Meiserstraße, 1954/56 in der Müllerstraße, 1954/56 Am Perlacher Forst und 1956/58 in der Theresienstraße. 1964 ging das erste große Gasturbinenheizkraftwerk Deutschlands in Sendling in Betrieb und 1966 die erste Müllverbrennungsanlage der Stadt im Heizkraftwerk Nord.

Derzeit (1985) betreiben die Stadtwerke 5 Heizkraftwerke zur Wärme- und Stromerzeugung sowie 9 Heizwerke zur Wärmeerzeugung (vgl. Tab. 39), die zu unterschiedlichen Anteilen mit den Brennstoffen Kohle, Erdgas, Heizöl und Müll beschickt werden können. Angeschlossen an das Fernwärmenetz sind mittlerweile große Teile der Innenstadt, nach Fläche etwa 1/3 des gesamten Stadtgebietes.

Die in München vorhandene Schadstoffbelastung der Luft wird weitestgehend im Stadtgebiet selbst und im direkt benachbarten Umland produziert. Immissionsmessungen des TÜV-Bayern, die von den Stadtwerken in Auftrag gegeben wurden, zeigten, daß die Hauptbelastung weniger von den Kraftwerken, als vor allem von den Einzelfeuerungsanlagen und dem Verkehr ausgeht. Die zuletzt genannten Einflüsse sind hinsichtlich ihrer Emissionen allerdings schwer quantifizierbar, während für den über die Stadtwerke gelenkten Energieumsatz verlässliche Daten vorliegen.

Tab. 39: Feuerungsanlagen der Stadtwerke München zur Strom- und Wärmeerzeugung (aus: Stadtwerke München 1985)

(die angegebenen Jahreszahlen geben die Inbetriebnahmedaten der heute arbeitenden Anlagen wieder; HKW = Heizkraftwerk, HW = Heizwerk)

HKW Nord	1964 - 84	Kohle, Erdgas, Heizöl, Müll
HKW Süd	1967 - 71	Erdgas, Heizöl, Müll
HKW Müllerstraße	1955 - 72	Kohle, Erdgas, Heizöl
HKW Theresienstraße	1957 - 62	Kohle, Erdgas
HKW Sendling	1961 - 63	Erdgas, Heizöl
HW Koppstraße	1967 - 69	Erdgas, Heizöl
HW Freimann	1972	Erdgas, Heizöl
HW Meiserstraße	1954 - 70	Erdgas, Heizöl
HW Kathi-Kobus-Str.	1965 - 79	Erdgas, Heizöl
HE Gaisbergstraße	1973 - 74	Erdgas, Heizöl
HW Perlach	1981	Erdgas, Heizöl
HW Schwabing	1960 - 75	Erdgas, Heizöl
HW Pionierkaserne	1977	Erdgas, Heizöl
HW Arabella Hotel	1970	Erdgas, Heizöl

1983 betrug der Brennstoffeinsatz der Stadtwerke für die Strom- und Wärmeversorgung 10 200 GWh, der sich aus 65% Erdgas, 19% Kohle, 12% Müll und 4% Heizöl zusammensetzte. Das gesamte, über die Stadtwerke abgewinkelte Energieaufkommen betrug 1983 knapp 25 100 GWh mit den Anteilen: 77% Erdgas, 7,5% Kohle, 5% Müll, 2% Heizöl, 1,5% Wasserkraft und 7% Fremdstrom (Stadtwerke München 1985). Nicht berücksichtigt bei diesen Zahlen sind zusätzliche, über private Händler in die Stadt gelangte und dort verbrauchte Mengen an Brennstoffen wie besonders Heizöl und Benzin.

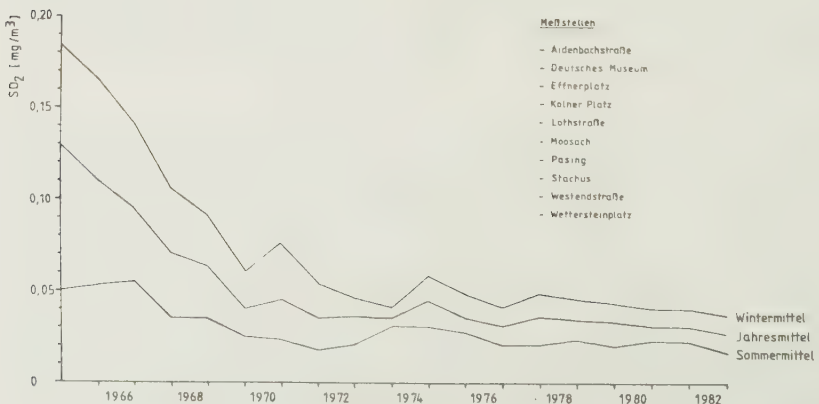


Abb. 28: Entwicklung der mittleren SO₂-Immissionen in München 1965 bis 1982 (nach Daten des Bayerischen Landesamtes für Umweltschutz)

Aus der Darstellung in Abb. 28 geht hervor, daß die Entwicklung der SO_2 -Immissionen in München besonders in den 60er Jahren stark rückläufig waren. Es ist zu vermuten, daß die Schwefeldioxid-Belastung der Luft im nicht dokumentierten Zeitraum vor 1965 noch weit höher gelegen war. Im Januar 1964 wurden während einer Inversionswetterlage höhere SO_2 -Konzentrationen gemessen, als sie im Ruhrgebiet damals üblich waren (SCHWÉGLER 1971).

Der Rückgang der SO_2 -Immissionen in München während der 60er Jahre ist um so eindrucksvoller, wenn man bedenkt, daß der Energieverbrauch gleichzeitig um ein Mehrfaches angestiegen ist. Abb. 29 zeigt den allein zur Strom- und Wärmeerzeugung der Stadtwerke verbrauchten Energieeinsatz für den Zeitraum 1960 bis 1983; in Abb. 30 ist der Primärenergieverbrauch Bayerns von 1950 bis 1978 dargestellt.

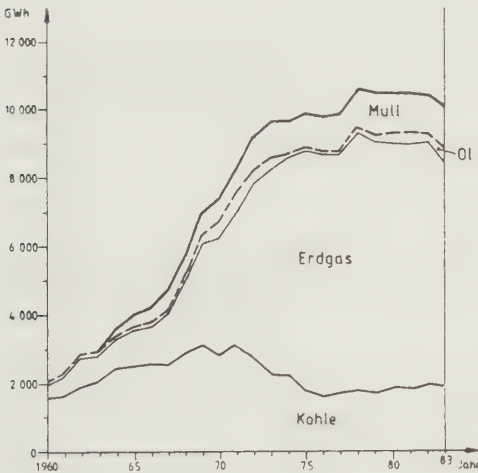


Abb. 29:

Entwicklung des fossilen Brennstoffeinsatzes der Stadtwerke München zur Strom- und Wärmeerzeugung von 1960 bis 1983 (Stadtwerke München, 1985)

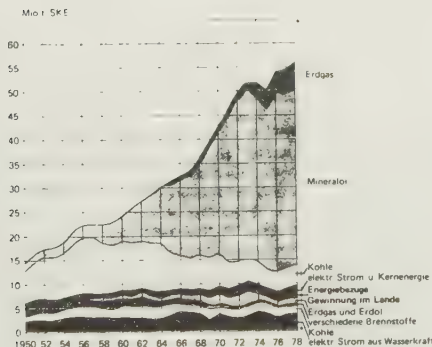


Abb. 30:

Primärenergieverbrauch in Bayern von 1950 bis 1978

(aus: 5. Raumordnungsbericht der Bayerischen Staatsregierung, 1980)

Die enorme Verbesserung der lufthygienischen Situation in München, vor allem was die Schwefeldioxid-Belastung angeht, wurde zum einen durch den intensiven Aufbau der Fernwärmeversorgung seit den 50er Jahren erreicht, zum anderen durch massiven Einsatz des umweltfreundlichen Erdgases, das den Verbrauchsanstieg ganz auffing und sogar noch den Kohle- und Heizölbedarf absolut zurückdrängen konnte (Abb. 29). Schließlich beginnen die schrittweise eingeführten gesetzlichen Vorschriften zur Reinhaltung der Luft zu greifen, wie z.B. die 1974 erlassene Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft, die seit 1983 bestehende Großfeuerungsanlagenverordnung sowie die 1984 verschärften Umweltschutzbestimmungen zur Rauchgasreinigung.

Bis 1995 rechnen die Stadtwerke mit weiteren Schadstoffreduzierungen auf unter ein Drittel der heutigen Emissionswerte durch

- den weiteren Ausbau der Fernwärmeversorgung um etwa 50 %,
- die Einführung moderner und "sauberer" Verbrennungstechnologien,
- Konzentration der Heizkraftwerke auf weniger Standorte.

Abb. 31 zeigt die im "Energiekonzept der Stadtwerke 1985" (Stadtwerke München, 1985) festgeschriebenen Vorgaben, nach denen der Ausstoß von Schwefeldioxid auf rund 40 %, der von Stickoxiden auf rund 25 % ihrer heutigen Werte gesenkt werden soll.

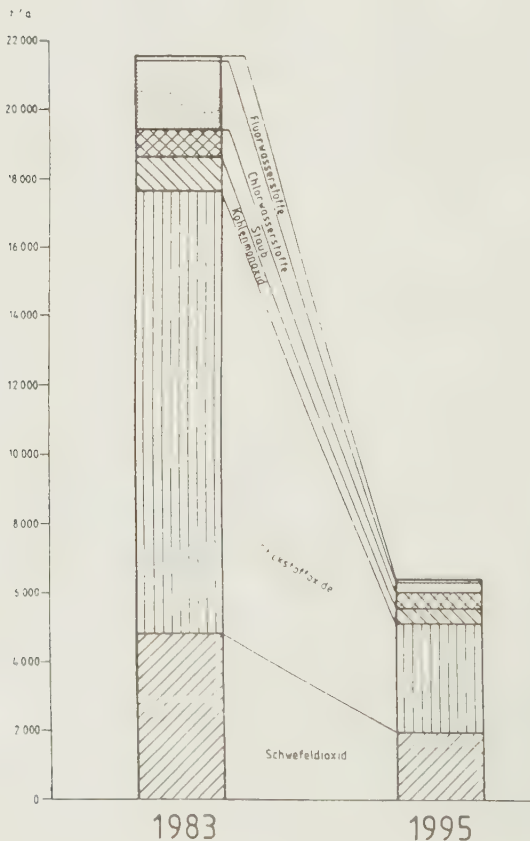


Abb. 31:

Derzeitige und künftige Schadstoffemissionen der Strom- und Fernwärmeerzeugungsanlagen der Stadtwerke München

(Stadtwerke München 1985)



Abb. 32: Fossiler Brennstoffbedarf und Mülleinsatz für die Strom- und Fernwärmeerzeugung der Stadtwerke München bis 2005 (Stadtwerke München, 1985)

Abb. 32 gibt die in Zukunft veränderte Struktur des fossilen Brennstoff- und Mülleinsatzes wieder, die im wesentlichen angestrebt wird, um eine Verringerung des heute zu 90 % importierten Gasanteils erreichen zu können. Größere Bedeutung kommt demnach wieder der Steinkohle zu (von der Ruhr und der Saar), zu deren Abnahme sich die Stadt 1980 mit dem Beitritt zu dem zwischen der öffentlichen Elektrizitätswirtschaft und dem deutschen Steinkohlebergbau abgeschlossenen "Jahrhundertvertrag" verpflichtet hat. Nach dem 1985 beschlossenen "Energiekonzept der Stadtwerke München" wird diese Kohle dann nur noch im Heizkraftwerk Nord verfeuert werden. Schließlich ist die Beteiligung der Stadt an 25 % der Leistung des neuen Kernkraftwerks Isar 2 vorgesehen.

5.10.1.4. Straßenverkehr

Bei der vorangegangenen Betrachtung über die Industrialisierung Bayerns wurde die Entwicklung des Automobils noch ausgeklammert. Während bei den Dampfmaschinen der Nutzungsgrad durch die zweifache Umwandlung der Verbrennungswärme zuerst in Dampf und dann in mechanische Energie noch recht niedrig war, konnte im "Explosionsmotor" die Verbrennungsenergie der aus Erdöl gewonnenen Kraftstoffe direkt auf die beweglichen Kolben übertragen werden. August OTTO betrieb 1876 seinen Viertaktmotor noch mit Gas, das der Steinkohleverkockung entstammte. 1883 stellten Gottlieb DAIMLER und Wilhelm MAYBACH den ersten benzinbetriebenen Vergasermotor vor. 1893-97 entwickelte Rudolf DIESEL einen mit Dieselöl arbeitenden Motor.

Bald nach der Entwicklung des Automobils setzte der Einsatz der neuen Maschinen im öffentlichen Verkehr ein. In München eröffnete bereits 1897 eine erste private Motoromnibuslinie, 1906 folgte die erste städtische Buslinie (MEGELE 1951).

1899 wurde in München die erste Autonummer der Welt erteilt. Dennoch hielt sich das Auto im Straßenbild noch sehr im Hintergrund. Auf etwa 150 daraufhin untersuchten historischen Photographien von Straßenansichten Münchens aus den Jahren 1890 bis 1925 (HOLLWECK, 1972; SEMBACH, 1977; BAUER & GRAF, 1985) tauchen lediglich auf 7 Aufnahmen Kraftfahrzeuge auf. 2 Kraftwagen sind 1906 am Stachus zu sehen, 1908 ebenfalls am Stachus 10 Autodroschken, 1911 in der Residenzstraße 1 PWK, 1912 vor dem Hauptbahnhof etwa 20 Autodroschken, 1913 ein Motorbus am Stachus, 1915 ein Personenkraftwagen am Luitpoldblock und 1925 schließlich 11 PKWs in der Theatinerstraße (damals existierten im gesamten Deutschen Reich an die 100 000 Kraftfahrzeuge).

In den 20er und 30er Jahren führte der rasch ansteigende Kraftfahrzeugverkehr zur Einführung von Ampelanlagen und zur Konzeption der ersten Autobahnen. Bereits um die Jahrhundertwende waren zahlreiche Straßen und Brücken verbreitert, Holzkonstruktionen durch massive Steinbauten ersetzt worden, Asphaltdecken aufgebracht und zahlreiche Straßenunterführungen unter Schienenbauten angelegt worden. Der nach dem 2. Weltkrieg weiter ansteigende Autoverkehr führte zu den großzügigen Anlagen des Altstadtringes und des Mittleren Ringes, zu weiteren Straßenverbreiterungen und schließlich auch zur Absperrung der innerstädtischen Fußgängerzone vor dem zunehmend lästig werdenden Verkehr.

Abb. 33 zeigt die seit den 60er Jahren beständig angestiegenen Fahrleistungen, wie sie für die Bundesrepublik berechnet wurden. Der Anteil des innerstädtischen Verkehrs beträgt recht genau jeweils 50 % der Gesamtfahrleistung.

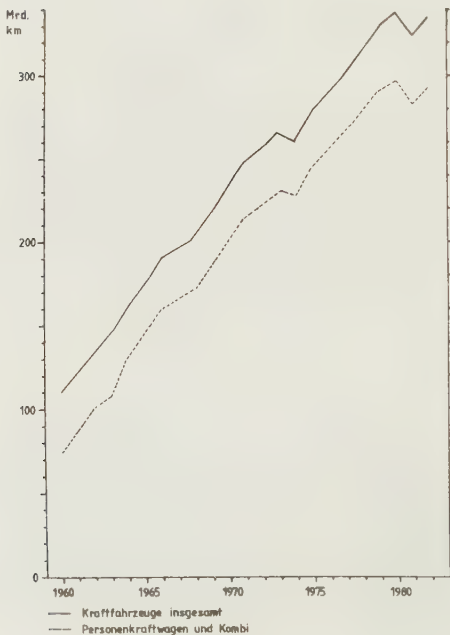


Abb. 33:

Fahrleistungen des Kraftfahrzeugverkehrs in der Bundesrepublik Deutschland von 1960 bis 1982

(nach UBA 1984)

1973 betrug der Kraftfahrzeugbestand der Stadt München ca. 420 000; bis 1984 war er auf 550 000 angestiegen (Statistisches Handbuch, 1985). In der Bundesrepublik waren 1984 recht genau 30 Mio. zivile Fahrzeuge zugelassen; 85 % davon waren Personenkraftwagen.

Verkehrszählungen an verschiedenen Punkten der Stadt ergaben:

Tab. 40: Verkehrszählungen in München 1977 und 1984
(Mittlere Zahl von Kraftfahrzeugen pro Stunde in beiden Richtungen; Meßzeit: 6-22 Uhr; aus: Statistisches Handbuch 1985)

	1977	1984
Donnersberger Brücke	4 800	6 300
Sonnenstraße	3 400	3 400
Thomas-Wimmer-Ring	2 200	2 300
Thierschstraße	260	330

Auf dem städtischen Teilstück der Autobahn München-Nürnberg bewegten sich in den frühen 70er Jahren im Durchschnitt pro Stunde ca. 1 700 Fahrzeuge, 1984 waren es über 2 500. Etwas niedriger lagen die Zahlen für die anderen Autobahn-Ausfallstrecken.

Einer groben Abschätzung zufolge wurden beim Betrieb der 420 000 im Jahr 1973 in München zugelassenen Kraftfahrzeuge pro Jahr emittiert:

300 000 t	Kohlenmonoxid
50 000 t	Kohlenwasserstoffe
40 000 t	Stickoxide
500 t	Ruß und Staub
300 t	Blei

(Die Zahlen wurden aus Angaben, die SCHWEGLER (1971) für die BRD gemacht hat, für München herausgerechnet.)

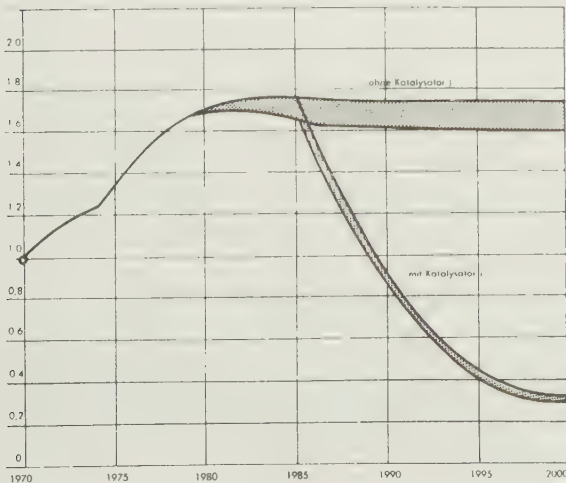


Abb. 34:

Relative Änderungen
der NO_x -Abgasemissionen für PKW (ab 1980
Prognose) in der BRD
(1970 = 1)

(UBA 1984)

Auf der Grundlage der
ELF Abgasprognose
Übereinstimmung mit der
Katalysator-
Prognose mit weniger 90
nach 10 Jahren Betrieb 85 %

Der Kraftfahrzeugverkehr hat heute besonderen Anteil an den Emissionen der Stickoxide, die sich als Nitratsalze in den meisten Ausblühungen der Kapillarwassersäume wiederfinden (vgl. Abschnitt 6.2.5.). Wichtig für die Verschmutzung und Verkrustung von Naturwerksteinen sowie offenbar auch für die katalytische Umsetzung von SO_2 in säurebildendes Sulfat ist daneben der Ruß, der zu großen Teilen von den Diesel-betriebenen Fahrzeugen emittiert wird.

Während der Gesamtenergieverbrauch in der Bundesrepublik seit den 70er Jahren in etwa konstant geblieben ist, sind die Fahrleistungen im Straßenverkehr weiterhin angestiegen. Dies und der Einsatz kraftstoffsparender, aber emissionsintensiver Motoren haben dazu geführt, daß heute fast die Hälfte der Schadstoffemissionen vom Straßenverkehr verursacht werden. Abb. 34 zeigt auf, wie der NO_x -Ausstoß der PKWs durch konsequente Anwendung der Katalysator-Technik in 5 bis 10 Jahren auf knapp 15% der heutigen Werte vermindert werden könnte.

Die Schadstoff-Immissionen sind aber nicht die einzigen Auswirkungen des Straßenverkehrs, die zu Gesteinsschäden beitragen können. Einer der aggressivsten Stoffe ist das Streusalz, das bis vor kurzem Winter für Winter in großen Mengen auf den Fahrbahnen, aber auch auf Gehwegen und Treppenanlagen ausgebracht wurde. Seit dem Winter 1984/85 ist Privatpersonen der Einsatz von Streusalz untersagt, die öffentlichen Betriebe sind zu sparsamem Umgang mit Salz angehalten. Der Ersatz des Natriumchlorids durch Ammoniumsalze könnte möglicherweise eine Abmilderung der ärgsten Steinschäden bewirken, grundsätzlich läßt sich das Salzproblem damit natürlich nicht lösen.

Durch den Abrieb an Straßenbelägen und Autoreifen entstehen feine Partikel von mit Ruß und Schwefel durchmengtem Gummi, von Bitumenteilchen aus dem Asphalt und von silikatischem und carbonatischem Gesteinsstaub aus den Zuschlagstoffen des Asphalts. Ein erheblicher Abrieb an Straßenbelägen war mit der Verwendung der Spikes-Reifen verbunden. Sie wurden 1959 eingeführt; in den 60er Jahren fuhren 20-40 % aller Fahrzeuge in den Wintermonaten mit "Spikes". Nachdem die Straßenschäden unübersehbar wurden - pro Jahr maßen die Abriebraten in den Spurrillen zwischen 2 und 10 mm (PEFFEKOVEN 1969) - erfolgte zu Beginn der 70er Jahre ein allgemeines Verbot der Benutzung von Spikes-Reifen.

5.10.1.5. Stadtentwässerung

Bis ins ausgehende 19. Jahrhundert hinein kam den zahlreichen, von der Isar abgeleiteten Münchner Stadtbächen große Bedeutung für die Energieversorgung, die Brauchwassernutzung und die Abwasserbeseitigung zu. Gebäudefassaden, welche mit den Wasserläufen in Verbindung standen, wurden beständig mit Feuchtigkeit versorgt, die in das ungeschützte Mauerwerk eindringen und dort Gesteinsschäden hervorrufen konnte. Niederschlagswässer, die im gesamten Stadtgebiet weitgehend unkanalisiert in den Boden drangen und sich dort mit eingeleiteten Abwässern vermischten, taten ein übriges zur Durchfeuchtung und Versalzung der Fundamente.

Die Stadtbäche dienten lange Zeit als praktische Abfuhrkanäle für die häuslichen Abwässer, auch für Fäkalien, welche in die Rinnsteine oder direkt in die Bachläufe geschüttet wurden. Hinzu kamen die gewerblichen Abwässer der an den Wasserarmen gelegenen Betriebe, worunter sich Mühlen aller Art (zum Zerkleinern von Gips, von Knochen, Gewürzen und Farbstoffen etc.) sowie Gerbereien, Spinnereien, Tabakfabriken und eine Salpeterfabrik befanden (PLESSEN 1983). Überschwemmungen nach starken Niederschlägen verteilten die Abwässer noch über die eigentlichen Kanalbereiche hinaus.

1812 wurden vereinzelt erste gemauerte Abwasserkanäle angelegt, weitere folgten in der Mitte des 19. Jahrhunderts. Auf Veranlassung des Hygienikers Max v. PETTENKOFER erhielt München ab 1881 als erste Stadt überhaupt eine planmäßig angelegte und flächendeckende Schwemmkanalisation, mit deren Hilfe ein großer Teil der organischen und anorganischen Schadstoffe fortan von den Gebäudefassaden ferngehalten wurde. In den 20er Jahren dieses Jahrhunderts entstand die Kläranlage Großlappen.

Maßnahmen wie die im letzten Jahrhundert begonnene Isar-Regulierung, der weitere Ausbau der städtischen Kanalisation (bis 1984 waren 96,5 % der Einwohner an das Kanalnetz angeschlossen (Statistisches Handbuch 1985)), die steigenden Entnahmen von Grundwasser aus den quartären Kiesen, der Bau des Sylvensteinspeichers vor 25 Jahren sowie die Auflassung der meisten Stadtbäche ab 1966 führten insgesamt dazu, daß die Gefahr von Gebäudeverwässerungen durch Grund- und Oberflächenwasser, durch versickerndes Regenwasser oder durch die Hochwässer der Isar weitgehend abgemildert wurde.

5.10.1.6. Bautätigkeit

Bei der Anlage von Tiefbauten (tiefe Unterkellerungen, Tiefgaragen, U-Bahn-Bauten, Straßenunterführungen) werden durch die oft notwendigen Wasserhaltungsmaßnahmen, durch Erschütterungen, durch die Massenaushübe und den anschließenden Massenaufbau der Bauwerke in der Regel Setzungen auch des umgebenden Baugrundes verursacht, die zu Rißbildungen in den bestehenden Gebäuden und gegebenenfalls zu Brüchen in den Natursteinbekleidungen führen können.

Während der Bauphase müssen große Mengen von feinkörnigen und lockeren Baustoffen ausgebracht und verarbeitet werden, die - windverblasen - den Staubgehalt der Luft mit Carbonat-, Gips- und Salzpartikeln anreichern. Durch Verbaumaßnahmen, Zuschneide- und Schleifarbeiten werden zusätzlich Staubeilchen emittiert. Schließlich werden nicht selten Baustoffreste zur Verfüllung von Ausschachtungen benutzt, welche gesteinschädliche, leicht lösliche Stoffe an das Sickerwasser abgeben können.

5.10.1.7. Bautechnik

Bausünden, auf deren Folgen in der Literatur immer wieder hingewiesen wird, sind u.a.:

- Das nicht lagerhafte Versetzen von schichtig ausgebildeten Sedimentgesteinen, das zum frühzeitigen Aufspalten und Abblättern der Schichtenlagen führt;
- der spät im Jahr erfolgende Verbau von bruchfeuchten und von ihrer Struktur her frostgefährdeten Gesteinen, die im Winter in Bereichen einer Kapillarwasserdurchfeuchtung durch Frost zerspringen können;
- der Einbau eng verzapfter Eisenklammern und -dübel, denen Gelegenheit zur Rostbildung gegeben ist. Durch die Volumenausdehnung des entstehenden Rostes werden selbst massive Gesteinsblöcke auseinander gesprengt.

Außer diesen seit langem bekannten Gefährdungen lassen sich noch eine Reihe weiterer Risiken für den Natursteinbestand aufzählen, die aus der Art der gewählten Bautechnik erwachsen können (vgl. hierzu auch DNV 1973):

Die nach dem Krieg durch das Gattersägeverfahren möglich gewordene rationelle Herstellung dünner Fassadenplatten aus Naturstein hat zu einer massenhaften Verwendung solcher Platten zur Gebäudeverkleidung geführt. Kam in früheren Zeiten den massiven Werksteinblöcken noch häufig eine wenigstens teilweise das Mauerwerk mit tragende Funktion zu, so dienen die heute an Stahldübeln vorgehängten Natursteinplatten ausschließlich dem Schmuck und dem Schutz der verkleideten Gebäudeteile. Den Vorteilen der meist nur 3 bis 5 cm dicken Platten (geringe Kubatur, leichter Transport und Verbau, einfacher Ersatz) stehen aber auch Nachteile gegenüber: Die gering dimensionierten Platten erweisen sich als wesentlich anfälliger gegenüber mechanischen Belastungen als massive Blöcke. Unstetigkeiten innerhalb der Gesteinsstruktur, feine Risse, schwach gebundene bzw. grob poröse Schichtlagen oder Gesteinspartien mit wechselnden Materialanteilen sind Schwachstellen, von denen Ankerdornausbrüche, Kantenabbrüche etc. ausgehen können. Dünne, vorgeblendete Sockelplatten oder Gewände von Toreinfahrten halten den Angriffen durch den Auto- und Lastverkehr kaum stand.

Häufig treten mechanische Beschädigungen an Bodenbelägen und Stufenplatten auf, welche durch die Verlegung auf einem nicht genügend widerstandsfähigen Estrich, durch den Verbau überstehender Trittplatten oder durch Konstruktionen frei über Bodenöffnungen verlegter Platten provoziert werden.

Ein neu erstelltes, mehrstöckiges Gebäude erfährt in der ersten Zeit nach dem Bau eine Setzung, einerseits durch Reaktion des Untergrundes auf die neue Belastung, andererseits durch das Schwinden der Mörtelstoffe beim Austrocknen. Die Setzungsbeträge mögen insgesamt gering und im Normalfall nur im Bereich von Millimetern meßbar sein, sie geben bei dicht gegeneinander versetzten und noch vor Abklingen der Setzung verbauten Steinverkleidungen dennoch Anlaß zu typischen Bruchschäden: Manchmal zerbrechen ganze Plattenreihen im Sockelbereich entlang einer bodenparallelen Linie; leichte Setzungsunterschiede zwischen den vollvermauerten Wandstücken und den Fensteröffnungsachsen zeitigen Risse und Brüche, die bevorzugt von den Ecken der Kellerfensteröffnungen ausgehen; Setzungsunterschiede zwischen 2 Gebäudeteilen erzeugen Risse im Baukörper, die sich bis zur Außenverkleidung hin durchpausen können.

Durch den Einbau von allzu fest eingespannten Metallrahmen von Installations-türen oder metallischen Gitterrosten können Brüche in den angrenzenden Natursteinplatten entstehen, wenn sich das Metall wärmebedingt unter stärkerer Spannungsentfaltung ausdehnt, als sie das Gestein zu tolerieren vermag.

Viele Baustoffe (Beton, Zement, Estrich, Mörtel, Putz etc.), korrodierende eisen- oder kupferhaltige Metallteile sowie manche Anstrichfarben, Imprägnier- und Putzmittel sondern Salze bzw. Farbstoffe ab, welche einerseits durch Ausblühungen und Verfärbungen die Erscheinungsweise der Sichtflächen von Natursteinplatten beeinträchtigen, andererseits mit zur Entstehung schwerwiegender Salzschäden beitragen.

Die Wirkungsweise des Niederschlagswassers am Gebäude wird im wesentlichen durch die Exposition und die Ausformung und Strukturierung der Bauwerksfassade festgelegt. Überstände ermöglichen die Bildung von Wasseransammlungen, von denen aus sich Kapillarwassersäume in die Gesteine hinein entwickeln können, Fugenspalten zwischen Werkstücken begünstigen ein tieferes Eindringen der Feuchtigkeit, in regengeschützten Bereichen akkumulieren sich Staub, Schwefeldioxidanwehungen und Luftfeuchtigkeit zur Gipskruste. Eine in besonderem Maße schadensträchtige Situation ist häufig in der Art der Anbindung des Gehwegbelages an die Gebäudesockel gegeben: Wird das Sandbett unter den Gehsteigplatten bis zur Fassade hin geführt, so kann das auf dem Gehsteig mit Salzen angereicherte Niederschlagswasser kapillar in die Sockelgesteine eindringen und hochreichende, mit Salzausblühungen und Salzschäden verbundene Kapillarwassersäume erzeugen.

Feuchte- und damit verbunden auch Salzschäden entstehen darüber hinaus durch Kondenswasser, das sich an Metallteilen der Fassadenkonstruktion niederschlägt und von dort aus die angrenzenden Gesteine durchnäßt. Typische Schäden kommen unter bestimmten Schaufensterkonstruktionen aus Metall vor, aus deren unterem Rahmenteil das im inneren Hohlraum kondensierende Wasser nach außen hin abgegeben wird.

5.10.1.8. Gesteinsauswahl

In früheren Zeiten wurde eine deutliche Trennung eingehalten zwischen Gesteinsarten, die im Außenbereich verwendet wurden und solchen für die Innenraumgestaltung (außen: Kalktuff, Konglomerate, Granit; innen: Polierte Marmore und dichte, bunte Kalksteine). Heute finden sich trotz aller Beständigkeitsprüfungen fast alle erhältlichen Gesteinsarten auch an den Außenfassaden verbaut. Gerade die bunten Kalksteine, die im neuen, polierten Zustand reizvoll anzuschauen sind, werden rasch rauh gewittert, bleichen aus oder verschmutzen derart, daß der einmal gewünschte (und bezahlte !) optische Eindruck nur während einer kurzen Zeit Bestand hat. Ein anderes Beispiel sind die gern verbauten Platten von polierter Blaubank (Muschelkalk), die früher oder später durch Ausbrechen der auswitternden Schillagen ihre Oberfläche auf unschöne Weise einbüßen.

Kann man sich bei den heimischen Gesteinsarten immerhin auf die meist langjährigen Erfahrungen im Umgang mit den verschiedenen Materialien beziehen, so liegen für die Vielzahl der heute modischen Gesteine aus dem Ausland oft überhaupt keine Erkenntnisse über ihr Langzeitverhalten vor.

Begünstigt wird die Entstehung späterer Verwitterungsschäden zweifellos durch Verwendung von bereits im Aufschluß primär minderwertigem oder bereits verwittertem Material, das entweder absichtlich in den Handel gebracht wird oder, aus Restbeständen eigentlich erschöpfter Vorkommen stammt.

Letztgenannte Möglichkeit wurde beispielsweise von STOIS (in REIS 1935) im Falle des Suevits diskutiert, der 1912 am Verkehrsministerium in München verbaut worden war und 1934 bereits nach dem Auftreten schwerer Verwitterungsschäden teilweise ersetzt werden mußte.

5.10.2. Unmittelbare anthropogene Einflüsse

5.10.2.1. Bearbeitung, Behandlung und Verbau von Naturwerksteinen

Auf dem Weg vom Gesteinsverband im Steinbruch bis zum Versatz an der Fassade werden die Werkstücke einer Reihe mechanischer Belastungen ausgesetzt. Im Steinbruch geschieht das Herauslösen der oft einige Kubikmeter großen Rohblöcke durch manuelles oder preluftbetriebenes Keilen, durch Loch-an-Loch-Bohren, durch Seilsägeschnittverfahren oder durch Lösen mit Hilfe von Sprengstoff und neuerdings bei quarzreichen Kristallingesteinen auch durch Einsatz eines Flammenstrahles. Die Blöcke wurden früher von Hand weiter verkleinert oder mit Sägen auf Werkstückgröße zugeschnitten. Die Gestaltung der Oberflächen geschah mit Bossierhämmern, Spitz- und Stockeisen. Gegebenenfalls folgte das Glattschleifen und Polieren der Sichtflächen. Heute werden große Blöcke meist im Gattersägeverfahren oder durch elektronisch gesteuerte Diamantsägeblätter in Platten zerlegt, diese maschinell auf das nötige Format zugeschnitten und, wenn nötig, auf Schleif- und Poliermaschinen oder durch Abflammen weiter behandelt. Ist eine steinmetzmäßige Bearbeitung von Werkstücken notwendig, so stehen leichte, elektrisch oder mit Preluft betriebene Meißel, Schleif- und Poliermaschinen zur Verfügung.

Die eingesetzten mechanischen Energien führen einerseits zwangsläufig und gewollt zur Materialzerstörung, andererseits dürfen sie natürlich keine allzu großen Schädigungen an den verbleibenden Werkstücken hervorrufen. Mit Sicherheit werden bei der Gesteinsverarbeitung Mikrorisse bzw. zunächst unsichtbare Gefügelockerungen in der Nähe der Gesteinsoberflächen erzeugt, welche die Entstehung von Verwitterungsschäden begünstigen können.

Die vielen Möglichkeiten der Gesteinsbehandlung zielen zunächst darauf hin, das Erscheinungsbild und die natürlichen Eigenschaften des Materials zu verbessern. Dabei wird oft mit chemisch und physikalisch stark wirksamen Methoden gearbeitet, so daß - ganz im Gegensatz zur beabsichtigten Wirkung - nicht selten aus der Behandlung eine Gefährdung der Steinsubstanz erwächst.

Bereits während der Verarbeitung der Werkstücke werden Bruchstellen geklebt, größere Hohlräume mit Kitt oder Steinersatzmasse ausgefüllt. Zum Schutz vor Verwitterung wurden früher verschiedene Öle, Bienenwachs, Kalkmilch, Fluat, Wasserglas u.ä. in Gesteine eingelassen; heute kommen Silikonharze zur Hydrophobierung hinzu. Verschmutzte Gesteine werden häufig mit anorganischen (Salzsäure, Flußsäure) oder organischen Säuren gereinigt, mit speziellen Reinigungspasten oder gegebenenfalls auch mit organischen Lösungsmitteln. Zur Festigung bereits verwitterter Gesteinspartien stehen Kunststoffe wie Epoxid-, Polyester- und Acrylharze zur Verfügung. Schließlich sind Farbanstriche und Putzschlämme zu erwähnen. (Über alte und moderne Gesteinsbehandlungsmethoden siehe WIHR 1980 und SNETHLAGE 1984).

Abgesehen von direkten Anwendungsfehlern können sich durch die Behandlung mit chemischen Mitteln ergeben:

- Schalenablösungen, wenn durch verklebenden Anstrich oder Imprägnierung der obersten Gesteinsschicht der Feuchte-austausch zwischen Gestein und Außenluft behindert wird und/oder die verfestigte äußere Gesteinsschale ein geändertes physikalisches Verhalten gegenüber dem inneren Gestein annimmt;
- Salzschäden durch Freisetzen von Ionen aus den eingesetzten Stoffen bzw. aus Reaktionen zwischen den Chemikalien und dem Gestein; ihr Entstehen wird ebenfalls begünstigt durch abdichtende Behandlungsmethoden, welche den Feuchte-austausch behindern;
- Verfärbungen durch die Mittel selbst oder durch Freisetzen von Salzen bzw. von fartragenden Stoffen.

Eine physikalische Behandlung von Werksteinen wird vor allem zur Säuberung verschmutzter Oberflächen oder zur Entfernung stark verwitterter Bereiche durchgeführt. Schonende Methoden sind das Besprühen mit reinem Wasser und das vorsichtige Abbürsten der verschmutzten oder verkrusteten Partien. Ein meist erheblicher Gesteinsverlust ist mit den Sandstrahlverfahren oder mit der "steinmetzmäßigen" Überarbeitung der Oberflächen verbunden.

Grobe mechanische Schädigungen, die sich beim Verbau der Werkstücke ereignen, werden im allgemeinen sofort mit dem Ersatz durch intakte Steine beseitigt. Kleinere Schädigungen wie Anbrüche an Ankerdornlöchern, Ecken- und Kantenabbrüche, kleine Risse etc. werden häufig an Ort und Stelle mit Klebstoffen und Gesteinskitt ausgebessert, wenn sie nicht überhaupt die Bauabnahme unbemerkt überstehen. Nachträgliche Riß- und Bruchschäden ereignen sich leicht beim Einbau bzw. beim Befestigen von Außeninstallationen, von Schriftzügen und Namensschildern, von Fenstergittern und Rolläden und - fast immer - beim offenbar allzu gewaltsamen Eintreiben von metallenen Vermessungszapfen in die Werksteine.

5.10.2.2. Verschmutzungen

Die durch Staubablagerungen grau und durch die Rußeinlagerung in den Gipskrustenbildungen schwarz gefärbten Flächen an Gebäuden und Baudenkmälern stellen die wichtigsten anthropogenen Verschmutzungen dar. Sie gelangen indirekt, auf dem Weg über die Luft und den lockeren Straßenstaub, an die Gesteine heran.

Die direkten anthropogenen Verschmutzungen haben in der Regel nur eine begrenzte flächenmäßige Ausdehnung, sie kommen allerdings in sehr vielgestaltigen Ausformungen vor. Eine kleine Auswahl von häufiger anzutreffenden Verschmutzungen mag hier genügen: Farbspritzer und Putzreste; Plakatierungen und deren abtropfender Leim; Schmierölverschmutzungen an Fensterscharnieren und Führungsschienen an Rolläden; Rußflecken aus Auspuffrohren; Hundeklos und Streupulver gegen Hundeklos; Beschriftungen aller Art, insbesondere solche mit Sprühlack und deren Beseitigungsspuren etc.

5.10.2.3. Mechanisch verursachte Schäden

Sehr viele der besonders im Sockel- und Erdgeschoßbereich verbauten, nur wenige Zentimeter dicken Fassadenplatten gehen durch einmalig oder wiederholt eintretende Schläge oder Stöße zu Bruch. Hauptverursacher derartiger Schäden ist der Autoverkehr, meist durch direktes Auffahren bei Unfällen oder durch ungenaues Einfahren in zu enge bzw. unzureichend geschützte Toreinfahrten. Weitere Schäden entstehen bei Bauarbeiten, bei Be- und Entladungsvorgängen und auch durch mutwillige Zerstörung.

Bodenbeläge und Treppenstufen sind durch Herabfallen schwerer Lasten gefährdet. Im Kontakt zu fest eingespannten Rolläden oder zu Tür- und Fensterrahmen kann es durch ständig wiederholte Bewegungen zu Ausbrüchen kommen. Auf die Bruchgefährdung durch nachträglich angebrachte Installationen wurde bereits hingewiesen. Während die dünnen Fassadenplatten meist vollständig, am Rand oder in der Mitte zerbrechen, wirken sich Schläge und Stöße an massiveren Werkstücken meist nur in Form von Eck- und Kantenabbrüchen aus.

Ältere Gebäude- und Denkmalsteine weisen in bestimmten Stadtgebieten Kriegsschäden aus dem zweiten, zum Teil auch aus den Zeiten der Revolution nach dem ersten Weltkrieg auf (Alter Justizpalast; Armeemuseum; TU-Hauptgebäude; Siegestor u.a.m.). Neben starken Gesteinszerstörungen durch Explosionen und Brand finden sich dort häufig kraterförmige und von Rissen durchsetzte Einschlagstellen von Geschoskörnern überliefert.

Ständige Belastungen durch Fußgängerverkehr können an Bodenbelägen und Stufenplatten zu Bruchschäden führen. Überstehende oder gar frei tragende Stufenplatten halten der dauernden Trittbelastung häufig nicht stand. Ein ungleichmäßig verarbeiteter Estrich kann ausgetreten werden, so daß die darüberliegenden Steinplatten des Bodenbelages zerbrechen.

Risse und Brüche in Fassadenplatten, die von den Verankerungslöchern ausgehen, können ihre Ursache in dauernden Erschütterungen durch den Auto-, den Straßenbahn-, den U- und S-Bahn-Verkehr haben.

Durch das Begehen von Stufensteinen und Bodenplatten wird an diesen durch die Reibung der Gehbewegung und durch die schleifende Wirkung von Staubkörnern Gesteinsmaterial abgetragen. Bei älteren Stufen und Böden hat der Abtrag oft zu Vertiefungen im Tritt- und Gehbereich geführt. In gewisser Hinsicht kann eine Trittbearbeitung auch erhaltend wirken, wenn der Gehbereich von Verschmutzungen und Versalzungen frei gehalten wird. Fehlen die abschleifend wirkenden Staubkörner, so kann die Begehung von Steinplatten zu deren Politur beitragen.

Die schleifende Berührung von Gesteinen in engen Passagen, an Steinbrüstungen oder Sitzbänken durch Kleidungsstücke von Passanten kann ebenfalls eine Politur, besonders an Carbonatgesteinen, erzeugen. Manchmal nehmen die häufig berührten Gesteinsoberflächen ein speckig-schmutziges Aussehen an.

6. ANALYSEN VON VERWITTERUNGSERSCHENUNGEN

In Abschnitt 2.3.5. wurde bereits auf die verschiedenen Verwitterungsphänomene eingegangen. Die bei der Allgemeinen Stadtkartierung gewonnenen Beobachtungen zum Verwitterungszustand wurden dort zu "Einzel-Verwitterungserscheinungen 1. Ordnung" zusammengefaßt und nach den Überbegriffen gegliedert:

- Bearbeitung der Oberfläche,
- Durchfeuchtung,
- Verfärbung und Entfärbung,
- Stoffanhaftung, Stoffneubildung, Stoffumbildung,
- Zerteilung und Materialverlust.

In vereinfachter Form finden sich die Kartierbeobachtungen aufgezeichnet in der Stadtkarte zum "Verwitterungszustand" (Anlagen 2a und 2b).

Mit der Klassifizierung von Einzelercheinungen ist der Aussagegehalt der Beobachtungen zum Verwitterungszustand der Gesteine aber bei weitem nicht erschöpft. Es zeigt sich, daß nur ein Teil der Einzelphänomene 1. Ordnung isoliert gesehen und seine Entstehung auf jeweils eine bestimmte einzelne Ursache zurückgeführt werden kann. Die meisten Einzelercheinungen sind nur in Kombination mit anderen Erscheinungen erklärbar. Es sind sichtbar werdende, genetisch voneinander abhängige Ausprägungen bestimmter Verwitterungsvorgänge ("Verwitterungserscheinungen 2. Ordnung"). Der Zusammenhang der Erscheinungen untereinander ist durch die Gesetzmäßigkeiten der jeweils zugrunde liegenden Verwitterungsprozesse gegeben.

Als 'Verwitterungserscheinungen 2. Ordnung' werden im folgenden beispielhaft untersucht:

- Schäden durch Ausblühungssalze im Sockelbereich von Gebäuden,
- 'Normalverwitterung' des Muschelkalks,
- Schalenverwitterung nordostbayerischer Granite.

Vorweg werden die weniger komplexen Erscheinungen mechanisch verursachter Bruchschäden kurz vorgestellt.

Der Ausdruck 'Normalverwitterung' soll diejenigen Vorgänge und Erscheinungen bezeichnen, die sich an einer frei vor einer Gebädefassade schwebenden Werksteinplatte vollziehen würden; im wesentlichen: Verschmutzungen durch Luftstaub; Gipskrustenbildungen in regengeschützten Positionen; Abwaschungen und bei Carbonatgesteinen Rauhe Abwitterung bzw. 'Mikrokarst' auf den regenausgesetzten Seiten sowie evtl. Entfärbungen. Mit der gedanklichen Vorstellung des 'normal' verwitternden Gesteins ist eine Möglichkeit gegeben, die zusätzlich zur eigentlichen "Witterung" wirksam werdenden Einflüsse durch die Bauwerksmorphologie, durch benachbarte Bauten und Bauteile, durch mitverwendete Baustoffe etc. ausklammern zu können. Verwitterungserscheinungen, welche durch

diese zusätzlichen Faktoren ausgelöst werden und damit nicht zur 'Normalverwitterung' gehören, sind beispielsweise: Kapillarwassersäume; daraus hervorgehende Salzsäden; Frostschäden durch Stau- oder Sickerwassernässe; die meisten allochthonen Verfärbungen; mechanisch verursachte Bruchschäden; mechanische Abnutzung u.a.m.

Die nun vorgestellten Analysen von Verwitterungserscheinungen basieren auf Spezialkartierungen, welche ausschließlich die gerade zu behandelnde Verwitterungsform zum Thema hatten. Damit konnten weit differenziertere Beobachtungen gesammelt werden, als es bei der Allgemeinen Stadtkartierung der Fall war. Neben der Beschreibung der jeweiligen Phänomene wird versucht, Abhängigkeiten zwischen den Verwitterungserscheinungen und ihren Ausprägungen und der Expositionsdauer bzw. der Expositionsrichtung herauszuarbeiten.

Die rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen konnten am Lehrstuhl für Geologie der Technischen Universität München in Garching in Zusammenarbeit mit Herrn Dipl.-Geol. W. LINDENTHAL und mit der freundlichen Unterstützung durch Herrn Dr. J. FROH hergestellt werden. Dabei standen ein Rasterelektronenmikroskop (REM) der Firma JEOL, Typ 35 C, und ein Zusatzgerät zur energiedispersiven Röntgenanalyse (EDAX) der Firma ORTEC, Typ ED 5 II, zur Verfügung.

6.1. Bruchschäden

Die Zahl der durch Bruch beschädigten Werkstücke in der Münchner Innenstadt ist hoch, ihr Anteil im Verein der Gesteinsschäden bedeutend. Bei der üblichen Verwitterung hält die Entwicklung der Schäden über lange Zeiten hinweg an, bevor ein Stadium erreicht wird, das zu einer Renovierung oder gar zu Befürchtungen einer Gefährdung von Bauwerk und Passanten Anlaß geben könnte. Eine gebrochene Fassadenplatte dagegen büßt meist sofort und oft vollkommen ihre Funktionen als optisches Element und als Bauwerksschutz ein. Zudem stellen lockere Bruchstücke, Ankerdornausbrüche, beschädigte Stufenplatten etc. Unfallrisiken für Passanten dar. Etwas weniger gravierende Folgen ziehen abgebrochene Kanten oder Risse an massiveren Werkstücken nach sich.

Die Bruchschäden an den Natursteinen der Münchner Innenstadt wurden im Zuge einer speziellen Kartierung recht detailliert aufgenommen (Tab. 41). Eine ins einzelne gehende Erörterung von Schadenszahlen und -ursachen würde hier unangemessen viel Raum in Anspruch nehmen, so daß sich die folgenden Ausführungen auf die Mitteilung einiger wesentlicher Ergebnisse beschränken.

Bruchschäden an Naturwerksteinen werden in aller Regel durch anthropogene Einwirkungen direkter oder mittelbarer Art ausgelöst. Nur wenige Schadensursachen sind außerhalb dieses Bereiches zu suchen:

- Frostsprengungen durch im Hohlraumgefüge der Gesteine gefrierendes Wasser. Sie sind in München in nur sehr geringer Zahl zu beobachten.

Tab. 41: Auszug aus der Spezialkartierung: Bruchschäden an Naturwerksteinen

Angerviertel

A 20 Rosental 4	<u>Muschelkalk - Sockel</u> 1 Platte an unterer Kante gebrochen.
A 20 Rosental 5	<u>Muschelkalk - Wandstreifen</u> Untere Platte (100 x 6 cm, aufrecht verbaut; 2 cm dick) 2 x gebrochen.
A 20 Rosental 7	<u>Nagelfluh (Ceppo) - Platten unter Schaufenster</u> 2 Platten (100 x 40 cm, längs verbaut) verstellt und an den Kanten gebrochen. 1 Platte (100 x 40 cm, längs verbaut) 2 x gebrochen.
A 20 Viktualienmarkt 12	<u>Knollenkalk - Stufenplatten vor Schaufenster</u> Große, alte Platten (300 x 100 cm) ausgewittert, durchgebrochen, Kanten abgebrochen.
A 20 Viktualienmarkt 14	<u>Travertin - Bodenplatten</u> 2 Platten durchgebrochen; 1 Platte an der Vorderkante gebrochen.
A 20 Rindermarkt 1	<u>Muschelkalk - Platten unter Schaufenster</u> 1 Platte (100 x 90 cm, längs verbaut) an Lüftungsschlitze ge- brochen.
A 20 Rindermarkt 1	<u>Granit - Stufenplatte unter Schaufenster</u> Ecke gebrochen, dort wo Türpfosten angebracht ist.
A 20 Rindermarkt 3, 4	<u>Muschelkalk - EG-Fassade</u> 1 untere Eckplatte (80 x 80 cm) an 2 Ecken gebrochen. 2 untere Platten an Dübelstellen gebrochen. 1 Wandplatte (70 x 20 cm, aufrecht verbaut) in 1,5 m Höhe gebrochen.
A 20 Rindermarkt 7	<u>Travertin - Wandstreifen</u> 1 Platte (100 x 30 cm, aufrecht verbaut) gebrochen; in der Platte ist eine Leitungsbefestigung installiert.
A 20 Rindermarkt 7	<u>Travertin - Stufenplatten vor Schaufenster</u> 2 Platten am vorderen Rand ausgebrochen.
A 20 Rindermarkt 7	<u>Travertin - Fassadenplatten unter Schaufenster</u> 3 Dübelausbrüche.
A 21 Kirche St. Peter	<u>Treuchtlinger Kalk - Stufenplatten</u> Einige Kantenabbrüche; 1 Stufenplatte durchgesprungen.
A 21 Kirche St. Peter	<u>Muschelkalk - Sockel (1 m hoch)</u> 9 x Kanten, 1 x Ecke ausgebrochen. 1 Platte (70 x 30 cm, längs verbaut) leicht nach innen gekippt; dabei Kante ausgebrochen.

Da Frostschäden durch fachgerechten Verbau und durch Verwendung frostsicherer Gesteine weitgehend zu vermeiden sind, könnte man sogar von mittelbar anthropogen erzeugten, oder doch zumindest ermöglichten, Schäden sprechen.

- Gesteinssprengungen durch Wurzeldruck.
Aus der Münchner Innenstadt liegen hierzu keine Beobachtungen vor. Einzig das Auseinanderpressen von Stufensteinen in Parkanlagen, die auf Naturboden verlegt sind, ließe sich erwähnen.
- Eventuell geht eine Anzahl von Absprengungen scherbiger Gesteinsteile an den Kanten von sehr eng aufeinander versetzten Fassadenplatten auf Bewegungsvorgänge zurück, die durch thermische oder hygrische Dehnung ausgelöst wurden. Es kann sich aber auch um Pressungen infolge einer Gebäudesetzung handeln.

Die Ursachen der zahlreichen mechanisch entstandenen Brüche an Naturwerksteinen durch anthropogene Tätigkeit oder Unterlassung sind äußerst vielfältig:

- Aus- und Durchbrüche durch einfachen Schlag oder Stoß, ausgelöst heute vor allem durch Autokontakte, aber auch im Zuge von Bauarbeiten oder durch Mutwilligkeit. Im Sockelbereich werden derartige Schäden durch den Verbau dünn dimensionierter Fassadenplatten begünstigt.
- Ankerdornausbrüche infolge zu dünner Dimensionierung der Platten oder fehlerhafter Ausführung der Verankerung. Zum eigentlichen Bruch können dann ein sonst unbedeutender Stoß, der Winddruck oder das Eigengewicht der Platte Anlaß geben.
- Setzung von Gebäuden und Gebäudeteilen.
 - durch Schwinden des abbindenden Mörtels,
 - durch Setzung des Untergrundes infolge der Gebäudeauflast,
 - durch Setzungen des Untergrundes infolge gebäudefremder Tiefbaumaßnahmen (U-Bahn-Bau; Tiefgaragen) oder Grundwasserabsenkungen,
 - durch ungleichmäßige Setzung von Gebäudeteilen.
- Horizontale Bewegungen von Gebäudeteilen, etwa durch thermische Dehnung von Betondecken.
- Installationen an Fassadenverkleidungen und an einzelnen Werkstücken:
 - Schäden beim Anbringen oder Abmontieren von Installationen (Dübel, Fensterrahmen, Türangeln, Rolläden, Markisen, Schriftzüge, Schrifttafeln, Beleuchtungseinrichtungen, Regenfallrohre, Halterungen für Fahnenstangen, Vermessungsbolzen etc.),
 - Schäden durch den Betrieb von Installationen (Metalltüren, Rolläden etc.),
 - Gesteinssprengung durch rostende Dübel und Eisenklammern,
 - Gesteinssprengungen durch Wärmedehnung fest eingespannter Metallteile.
- Trittbeanspruchung
 - Brüche in Bodenplatten durch nachgebenden Untergrund oder fehlerhaft ausgeführten Estrich,
 - Brüche freitragender sowie überstehender Stufenplatten durch zu geringe Dimensionierung der Platten, durch ungünstige Gesteinsauswahl oder ganz allgemein durch Überschreiten der Biegezugfestigkeit von Gesteinen.
- Kriegsschäden

Von den 772 Gebäuden, die in der Münchner Innenstadt wenigstens bereichsweise mit Natursteinen verkleidet sind (vgl. Tab. 3), weisen nach Auswertung der Spezialkartierung 499 Gebäude (= 65%) Bruchschäden auf. Häufig handelt es sich dabei um 'zufällig' eingetretene Schäden durch Schlag oder Stoß. Oft liegen den Gesteinsbrüchen aber auch systematische Ursachen zugrunde: Setzung der Gebäude, Senkung des Untergrundes, grundsätzlich fehlerhafter Verbau, zu geringe Dimensionierungen etc., die dazu führen, daß gleich mehrere bis viele Werkstücke eines Gebäudes beschädigt sind. 81 Gebäude (10 % der Gesamtzahl) stellen sich als ausgesprochene Problemfälle dar, bei denen oft mehrere Schadensursachen zum Bruch einer Vielzahl von Werksteinen geführt haben.

In Tabelle 42 sind die Zahlen der geschädigten Einzelwerkstücke in der Münchner Innenstadt wiedergegeben. Da beim Auftreten sehr vieler Bruchschäden an einem Gebäude summarisch verfahren werden mußte, beruhen die Werte zu etwa 1/3 der angegebenen Höhen auf Schätzungen. Die Schätzungen sind aber eher zu niedrig angesetzt, so daß die Zahlen den Mindestbestand an Bruchschäden widerspiegeln.

Tab. 42: Bruchschäden an Naturwerksteinen in der Münchner Innenstadt

	Fassaden- verkleidungen	Bodenbeläge und Stufen	Zusammen
Muschelkalk	930	260	1190
Donaukalk	610	80	690
Travertin	310	110	420
Treuchtlinger Kalk	220	160	380
Frankendolomit	140	30	170
Kalktuff	160	-	160
Kristalliner Marmor	60	20	80
restliche Carbonate	810	160	970
Granite	150	200	350
restliche Krist.-Gest.	80	20	100
Nagelfluh	220	20	240
Sandsteine	150	20	170
Zusammen	3840	1080	4920

Die Zahl der beschädigten Werksteine addiert sich auf mindestens 5 000. Ein gesteinspezifischer Vergleich, der die Anfälligkeit bestimmter Gesteinsarten gegenüber mechanischer Beanspruchung aufzeigen könnte, ist in diesem Falle schwierig, da bei der Aufnahme der Werksteinvorkommen die Zahl der einzelnen Werkstücke nicht berücksichtigt wurde.

Setzt man als Wiederbeschaffungswert eines beschädigten Gesteinsteiles einen Betrag von DM 200,- bis DM 300,- an (Materialkosten, Anfahrten, Steuer; vgl. auch DRABIK, FENKES & HARD 1982), so errechnet sich allein für die Münchner Innenstadt eine Schadenssumme von 1 bis 1,5 Mio. DM. Dabei ist zu berücksichtigen, daß zur Beseitigung der Schäden und der Schadensursachen oft weitergehende Baumaßnahmen nötig sind wie Gerüstaufbau, Abbrucharbeiten, Neuverlegung von Estrich, Bauveränderungen etc.

6.2. Schaden durch Ausblühungssalze im Sockelbereich von Gebäuden

Mit einer speziellen Kartieraufnahme der Münchner Innenstadt wurden die Schäden durch Ausblühungssalze in den Sockelbereichen der Gebäude erfaßt. Ein Auszug aus dem Kartiertext ist in Tab. 44 wiedergegeben.

Aufgezeichnet wurden alle zum Zeitpunkt der Kartierung im Jahr 1984 sichtbar gewesenen Ausblühungserscheinungen und die damit verbundenen Gesteinsschäden. Da das Erscheinen von Ausblühungen stark abhängig ist von den äußeren Bedingungen der aktuellen Luftfeuchtigkeit und der Lufttemperatur, wurden auch diejenigen Schäden ohne Beteiligung von Ausblühungen erfaßt, die ganz offensichtlich im Zusammenhang mit Salzaktivitäten entstanden waren. Häufig mußte unterschieden werden zwischen der allgemeinen rauen Abwitterung einer Fläche und einer eventuell zusätzlich durch die Wirkung von Salzen verstärkt ausgewitterten Zone. Gezählt wurden letztendlich diejenigen Erscheinungen, die entweder gegenüber dem frischen Gesteinszustand oder gegenüber einer allgemeinen Abwitterung deutlich als Salzverwitterungsschäden hervortraten. Nicht aufgenommen wurden bloße Verschmutzungen (z.B. Hundeklos) oder Vernässungen, wenn nicht zumindest Ausblühungen damit verbunden waren.

Die Art der Kartieraufnahme bevorzugte die aktuell vor sich gehenden Salzschäden. Weiße Ausblühungen und absandende Gesteinszonen sowie der bereichsweise intensive Zerfall von sonst intakten Werksteinoberflächen rufen stärkere Eindrücke hervor als bereits abgewitterte und inaktiv gewordene Kapillarsaumbereiche, aus denen die Salze ausgespült sind und deren Morphologie sich allmählich an diejenige der allgemein abgewitterten Oberfläche angleicht.

Aus den Angaben des Kartiertextes wurde eine Einstufung der Schadensintensitäten in 3 Kategorien vorgenommen: 'schwache Schäden', 'stärkere Schäden' und 'starke Schäden' (s.u.: Abschnitt 6.2.3.).

Salzschäden im Bereich der Gebäudesockel sind am häufigsten in den oberen Zonen der vom Gehsteig oder von Treppenstufen aufsteigenden Kapillarwassersäume ausgebildet ("Zone B" nach ARNOLD 1984). Weitere Schadenszonen ergeben sich am unteren Rand der von den Sockeloberkanten aus absteigenden Kapillarwassersäume sowie beiderseits von Vertikalfugen zwischen den Sockelquadern. Sie können auch auf Flecken und Nester begrenzt oder flächig verbreitet vorkommen oder von Kondenswasserbildungen an feuchtigkeitsbindenden Metallteilen ausgehen.

	Anzahl der Gebäude		rel. Anteile (%) 772 Vorkommen = 100 %
		(%)	
schwache Schäden	87	38	11 %
stärkere Schäden	118	48	16 %
starke Schäden	40	16	5 %
zusammen	245	100	32 %

Tab. 43: Häufigkeit von Salzverwitterungsschäden im Sockelbereich von Gebäuden der Münchner Innenstadt

Tab. 44: Auszug aus der Spezialkartierung: Schäden durch Ausblühungssalze im Sockelbereich von Gebäuden der Münchner Innenstadt

Kreuzviertel

K 11 Kardinal-Faulhaber-Str. 10 (Hypobank)

Westseite: Granit: Sockel

am Eingangsbereich hoch aufsteigende Kapillarwassersäure; helle, rauhe Abwitterung; Ausblühungssäure.

K 12 Lenbachplatz 7

Südseite: Treuchtlinger Kalk: Sockelplatten zwischen Metallfensterrahmen

Ausblühungen im untersten Bereich; 1 Platte mit Absanden und Abblättern der Oberfläche bis in 1 m Höhe; Ausblühungen.

K 12 Maxburgstr. 4

Ostseite: Muschelkalk: Sockelplatten unter vorstehenden Metallfensterrahmen

Ausbrechen der Oberfläche; Rauwitterung, Absanden, Ausblühungen. Einige Platten völlig zerstört.

Südseite: Muschelkalk: Sockelplatten unter vorstehenden Metallfensterrahmen

Ausbrechen der Oberfläche; Rauwitterung, Absanden, Ausblühungen. Einige Platten völlig zerstört.

Westseite: Muschelkalk: Sockelplatten unter vorstehenden Metallfensterrahmen

Ausbrechen der Oberfläche; Rauwitterung; Absanden; Ausblühungen.

Nordseite: Muschelkalk: Sockelplatten unter vorstehenden Metallfensterrahmen

Ausbrechen der Oberfläche; Rauwitterung, Absanden, Ausblühungen.

K 13 Pacellistr. 1

Westseite: Brannenburger Nagelfluh: Eingangsgewände-Platten

Starkes Absanden bis in 0,5 m Höhe (an Horizontalfuge endend).

K 13 Maxburgstr. 2

Nordseite: Treuchtlinger Kalk: Sockelplatten am Eingang

Abmehlen der Oberfläche unter Ausblühungen

Ostseite: Muschelkalk: Verkleidung des Treppenpodestes

Schwarze Verkrustung; Ausbrüche und Abplatzungen der verkrusteten Oberfläche; Absanden und Ausblühungen.

K 14 Promenadeplatz 15

Südwestecke: Treuchtlinger Kalk: Sockelplatten in Eingangs-Arkade

An 2 Sockelplatten helles Abmehlen und Ausblühungen bis in 0,2 m Höhe; partienweise tieferes, bröckelig-mehliges Auswittern.

K 14 Promenadeplatz 13 (Gunezrainer Haus)

Nordseite: Muschelkalk: Sockelplatten

An 2 Platten Ausbrüche bis in 0,1 m Höhe.

K 14 Hartmannstr. 6 (Austrian Airlines)

Ostseite: Brannenburger Nagelfluh: Vertikale Fassadenwandstreifen

2 Sockelstücke bis in 0,5 m Höhe stark absandend; tiefe Auswitterung.

Von den 772 Gebäuden der Innenstadt mit einer bis zum Boden reichenden Naturwerksteinverkleidung wiesen 245 Gebäude Schäden durch Ausblühungssalze im Sockelbereich auf, das sind 32 % oder ein knappes Drittel. Trifft man eine Wertung nach der Schadensintensität, so teilt sich die Gesamtzahl in 87 Gebäude mit 'schwachen Schäden', 118 Gebäude mit auch 'stärkeren Schäden' und 41 Gebäude mit zusätzlich oder ausschließlich 'starken Schäden' auf (Tab. 43).

6.2.1. Gesteinsarten

In Tabelle 45 finden sich die Zahlen der registrierten Salzschnäden den einzelnen Gesteinsarten zugeordnet. Gewertet wurde die pro Gebäude und Gesteinsart jeweils stärkste Form der Schädigung. Die 273 Nennungen verteilen sich auf 21 der insgesamt 34 in Kapitel 3 dieser Arbeit gegeneinander abgegrenzten Gesteinsgruppen.

Tab. 45: Von Salzschnäden betroffene Gesteinsarten

	Vorkommen im Sockel- bereich	%	Salzschnäden im Sockel- bereich	%	schwache Schnäden	%	stärkere Schnäden	%	starke Schnäden	%
Muschelkalk	252	100	88	35	40	16	37	15	11	4
Donaukalk	96	100	33	34	8	8	21	22	4	4
Trauchtlinger Kalk	67	100	19	28	5	7	13	19	1	2
Frankendolomit	27	100	7	26	4	15	3	11	-	-
Solnhofener Kalk	7	100	1	14	-	-	1	14	-	-
Kalktuff	29	100	12	41	5	17	7	24	-	-
Travertin	101	100	4	4	4	-	-	-	-	-
Knollenkalk	21	100	3	14	2	10	1	4	-	-
Untersberger Kalk	5	100	2	40	-	-	2	40	-	-
Wallenfels-Kalk	17	100	2	12	1	6	1	6	-	-
sonstige Carbonate	75	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Granite	132	100	46	35	12	9	27	21	7	5
Basalt-Tuff	8	100	1	12	-	-	1	12	-	-
Trachyt-Tuff	4	100	1	25	1	25	-	-	-	-
Gneis	27	100	2	8	1	4	-	-	1	4
Krist. Schiefer	11	100	1	9	-	-	1	9	-	-
Serpentinit	21	100	3	14	2	9	1	5	-	-
sonstige Krist.-Gest.	34	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bayer. Nagelfluh	38	100	23	61	2	5	12	32	9	24
Ceppo Nagelfluh	45	100	5	11	3	7	1	2	1	2
Grünsandstein	11	100	9	82	5	46	2	18	2	18
Buntsandstein	3	100	2	67	-	-	2	67	-	-
sonstige Sandsteine	15	100	9	60	2	13	2	13	5	34
Zusammen	1046	100	273	26	97	9	135	13	41	4
Carbonate (+Ceppo)	742	100	176	24	72	10	87	12	17	2
Kristallingesteine	237	100	54	23	16	7	30	13	8	3
Klastische Gesteine (- Ceppo)	67	100	43	64	9	13	18	27	16	24

Unter den Gesteinen in Tabelle 45 sind nicht vertreten:

- | | |
|-----------------------------|-------------------------------|
| - Rosenheimer Kalk | - Larvikit |
| - Enzenauer Kalk | - Dunkle magmatische Gesteine |
| - Devonkalke | - Porphyrit |
| - Botticino-Kalk | - Glimmerschiefer |
| - Zola-Repen-Kalk | - Suevit |
| - sonstige Carbonatgesteine | - Tonschiefer |
| - Kristalliner Marmor | |

Diese 13 Gesteinsgruppen, an denen keine Schäden durch Ausblühungssalze festgestellt wurden, kommen teils gar nicht als Gebäudesockel verbaut vor (Enzenauer Kalk, Rosenheimer Kalk, Porphyrit) oder nur in so geringer Zahl, daß eventuell mögliche Salzsäden an den wenigen Exemplaren nicht verwirklicht sind. Zum anderen Teil können bestimmte Gesteine als relativ resistent gegenüber einem Salzangriff angesehen werden, was besonders die Larvikite und die dunklen magmatischen Gesteine und - erstaunlicherweise - auch die kristallinen Marmore betrifft. Obwohl diese etwa 20mal im Sockelbereich oder als Eingangsgewändeplatten verbaut vorkommen, zeigen sie in der Münchner Innenstadt keine erkennbaren Salzsäden.

Zur Beurteilung der Schadensanfälligkeiten der einzelnen Gesteinsarten wurden aus dem Allgemeinen Kartiertext alle Sockelbereiche von Gebäudefassaden (Eingangsgewände, Sockelleisten, Sockelstücke, Sockelverkleidungen, Teile von Erdgeschoß- oder Gesamtfassadenverkleidungen) herausgezählt und in Tabelle 45 den Zahlen der geschädigten Sockelbereiche gegenübergestellt (vgl. auch Tab. 46).



Abb. 35: Intensitäten der Salzsäden in den Gesteinsgroßgruppen

In Abb. 35 wurde die Schadensverteilung innerhalb der Gesteins-Großgruppen aufgezeichnet. Die Klastite fallen dabei durch das von den anderen Gesteinsgruppen abweichende Verhältnis von geschädigten zu unversehrten Vorkommen auf. Der deutlich höhere Anteil an 'starken' Schädigungen deutet auf eine geringere Resistenz gegenüber einem Salzangriff hin. (Die Ceppo-Nagelfluh wurde aufgrund ihres besonderen Gesteinscharakters von den klastischen Sedimentgesteinen abgezogen und den Carbonatgesteinen zugeschlagen.)

Abb. 36 zeigt die Schadensverteilung für einige ausgewählte Gesteinsarten. Unterstellt man, daß - statistisch gesehen - auf alle Gesteinsarten ein gleiches Maß an Salzbelastung einwirkt, so kann man aus den Unterschieden der resultierenden Schadensintensitäten Rückschlüsse auf das Verhalten der Gesteine gegenüber dem Salzangriff ziehen.

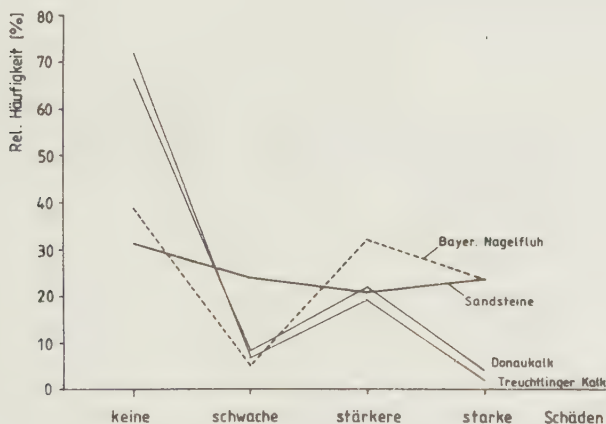


Abb. 36: Intensitäten der Salzschäden an einzelnen Gesteinsarten

Die Sandsteine sind generell leicht angreifbar durch Salze. Die gleichmäßige Besetzung aller 3 Schadenskategorien in Abb. 36 kann dahin gedeutet werden, daß ein leichter Salzangriff 'schwache Schäden' hervorruft, ein schwererer 'stärkere' usw. Daß relativ wenige Vorkommen ohne Schäden zu verzeichnen sind, kann außer an einer vorgegebenen, besonderen Verwitterungsanfälligkeit der klastischen Sedimentgesteine auch mit daran liegen, daß viele Sandsteinvorkommen bereits lange exponiert sind.

Die Bayerische Nagelfluh, insbesondere die Brannenburger Nagelfluh, zeigt sich noch empfindlicher als die Sandsteine. Hier führen offenbar bereits geringe Salzmenngen zum Entstehen 'stärkerer' und 'starker' Schäden. 'Schwache Schäden' und schadensfreie Vorkommen sind in vergleichsweise nur geringer Zahl vorhanden. Dies ist bemerkenswert, da die meisten Vorkommen von Brannenburger Nagelfluh erst jüngeren Verbaudatums sind.

Donaukalk und Treuchtlinger Kalk verhalten sich in etwa "normal"-verteilt: Einer Anzahl 'schwacher' Schäden stehen viele 'stärkere' und wiederum wenig 'starke' Schäden gegenüber. Ein nur leichter Salzangriff führt offenbar zu 'schwachen' Schäden, ein intensiverer zu 'stärkeren', wohingegen allerdings eine hohe Salzbelastung kaum 'starke' Schäden nach sich zieht. Dieser Umstand und auch der relativ hohe Anteil schadensfreier Vorkommen sprechen für eine gewisse Resistenz der dichten Carbonatgesteine gegenüber der Salzverwitterung.

Betrachtet man die absoluten Zahlen der Salzverwitterungsschäden an den einzelnen Gesteinsarten in Tab. 45, so bilden der Muschelkalk mit 88 Schäden, die Granite mit 46 Schäden, Donaukalk (33), Bayerische Nagelfluh (23), Treuchtlinger Kalk (19) und Kalktuff (12) die Spitze der Schadens-Rangfolge. Hiermit ist aber wenig über die tatsächliche Anfälligkeit der Gesteinsarten ausgesagt. Aufschluß darüber erhält man durch Vergleich der Schadenszahlen mit den Zahlen der Gesamtvorkommen. In Tab. 46 sind die einzelnen Gesteinsarten nach ihrem spezifischen Schadensanteil in der Reihenfolge abnehmender Schadensanfälligkeit geordnet:

	Zahl der Vorkommen	Zahl der Schäden	%-Anteile der Schäden
1. Grünsandstein	11	9	82
(2. Buntsandstein	3	2	67
3. Bayer. Nagelfluh	38	23	61
4. sonstige Sandsteine	15	9	60
5. Kalktuff	29	12	41
(6. Untersberger Kalk	5	2	40
7. Muschelkalk	252	88	35
8. Granite	132	46	35
9. Donaukalk	96	33	34
10. Treuchtlinger Kalk	67	19	28
11. Frankendolomit	27	7	26
(12. Trachyt-Tuff	4	1	25
(13. Solnhofener Kalk	7	1	14
14. Knollenkalk	21	3	14
15. Serpentin	21	3	14
16. Wallenfels-Kalk	17	2	12
(17. Basalt-Tuff	8	1	12
18. Ceppo Nagelfluh	45	5	11
19. Krist. Schiefer	11	1	9
20. Gneis	27	2	7
21. Travertin	101	4	4
Sonstige Gesteine	109	-	-
Zusammen	1046	273	26

Tab. 46: Rangfolge der Gesteinsarten nach dem spezifischen Schadensanteil
(Bei den mit Klammern versehenen Gesteinsarten sind die errechneten Schadensanteile aufgrund der geringen Vorkommenszahlen wenig aussagekräftig)

Sowohl die gesamte Gruppe, wie auch die einzelnen Arten der klastischen Sedimentgesteine (ausgenommen ist wiederum die Ceppo-Nagelfluh) nehmen in dieser Rangfolge die vorderen Plätze ein; fast 2/3 ihrer Vorkommen zeigen sich durch Salzangriff beeinträchtigt. Die Gründe für den hohen Anteil an Schädigungen liegen in der häufig nicht sehr intensiven Verfestigung der Gesteine, in der Verkittung des Korngerüsts durch relativ geringe Mengen von oft leicht auslösbarer Bindemittelsubstanz und in der dem kapillaren Wassertransport entgegenkommenden Ausbildung des Porenraumes.

Kalktuff, Muschelkalk, Granite und Donaukalk weisen mit 34 - 41 % einen höheren Schadensanteil auf, als es dem mittleren Wert für alle Vorkommen (26 %) entspricht. Ursachen hierfür sind in den zur Abwitterung neigenden Strukturen des Muschelkalks und der schalenbildenden Granite, mancher Varietäten des Donaukalkes und des wenig kompakten Kalktuffes gegeben. Zum Teil beruht die Schadenshäufigkeit auf der über 100jährigen Expositionszeit mancher Kalktuffe und Granite.

Treuchtlinger Kalk und Frankendolomit zeigen, gemessen am Mittelwert der Vorkommen, durchschnittliches Verhalten.

Unterdurchschnittlich häufig angegriffen sind die Knollenkalke, die aufgrund ihres heterogenen Gefüges eigentlich prädestiniert für die Ausbildung von Salzschäden sein sollten. Möglicherweise spielt hier der Umstand eine Rolle, daß die Mehrzahl der Knollenkalkvorkommen als neuere Stücke an renovierten Fassaden vorliegt und bis heute nicht genügend Zeit zur Schadensbildung verstrichen ist.

Relativ beständig sind Serpentinite, Wallenfels-Kalk, die Ceppo-Nagelfluh, kristalline Schiefer und Gneise.

Bemerkenswert ist die sehr geringe Schadenszahl bei Travertin, der nur an 4 (!) der insgesamt 101 Vorkommen 'schwache' Schäden zeigt. Offenbar gibt der dicht versinterter Kalkstein den Salzen nur geringe Angriffsmöglichkeiten zur Schadensentwicklung.

Auf die überhaupt nicht von Salzschäden betroffenen Gesteinsarten (Larvikit, kristalliner Marmor u.a.m.) wurde bereits hingewiesen.

6.2.2. Schadensformen

Die Ansprache der durch Ausblühungssalze verursachten Schadensformen wurde für die weitere Auswertung vereinfacht zusammengefaßt zu den 4 Formenkreisen:

- nur Ausblühungen
- Rauhwitterung
- Absanden
- Ausbrüche

Unter 'Rauhwitterung' (s.u.) wird eine bereits abgewitterte Oberfläche verstanden, bei der keine aktuell vor sich gehenden Ablösungen von lockeren Gesteinspartikeln beobachtet werden können. 'Absanden' (s.u.) bezeichnet den aktuell sichtbaren Gesteinszerfall in Einzelkornpartikel oder Teile davon (Abmehlen = 'Absanden'). 'Ausbrüche' (s.u.) sind Gesteinsablösungen in Form von Partikeln, welche über die Größeneinheit von Mineralkörnern hinausgehen.

Außerdem wurden diejenigen Schäden eigens ausgezählt, die mit sichtbaren Ausblühungserscheinungen verbunden waren. Bei diesen Zahlen ist zu beachten, daß das Auftreten von Ausblühungen in starkem Maße von der augenblicklichen Wetterlage und Jahreszeit abhängig ist.

Je nach der betroffenen Gesteinsart und ihrem spezifischem Gefüge können die einzelnen Salzverwitterungserscheinungen sehr unterschiedlich ausgebildet sein. In der folgenden Aufstellung sind unter den Oberbegriffen 'Rauhwitterung', 'Absanden' und 'Ausbrüche' die differenzierten Beobachtungen des Kartiertextes für die wichtigeren Werksteinarten mit häufigen Salzverwitterungserscheinungen wiedergegeben:

Muschelkalk

- Rauhwitterung

- leichte Aufrauhung, Anwitterung
(rauh gewitterte Oberfläche, Verlust der Politur bzw. der Schleifglätte)
- Rauhwitterung
(tiefer reichender Oberflächenverlust, gleichmäßig über die Fläche verbreitet)
- Auswitterung
(tieferreichender Oberflächenverlust mit Herauspräparierung eines Reliefs: Weiche Partien sind tiefer ausgewittert als härtere; Auswitterung von Schichtfugen und Stylolithenbahnen; löcherige Auswitterung durch selektives Auswittern der calcitisch gebundenen Schillpartien; Rundwittern der Kanten; Auswitterungen im Kapillarwassersaum)

- Absanden

- (Zerfall der Gesteinssubstanz in staub- und sandkorngroße Partikel, häufig mit Ausblühungen durchsetzt)

- Ausbrüche

- Ausbrüche
(Ausbrüche calcitisch gebundener Schillpartien durch Auswittern der feinkörnigen Kalkmatrix)
- Abplatzungen
(flächiges Abplatzen der bearbeiteten Oberflächenschicht bzw. von verkrusteten Teilen)

Donaukalk

- Rauhwitterung

- leicht raugewittert
(rauhe Anwitterung der bearbeiteten Oberfläche)
- Abwitterung
(flächenhafter Verlust der bearbeiteten Oberfläche)
- Auswitterung
(Verlust der bearbeiteten Oberfläche; Herauswittern eines Reliefs, das die Gesteinsstruktur oder die Lage des Kapillarwassersaums nachzeichnet)

- Absanden

- (Zerfall der Gesteinssubstanz in staub- oder sandkorngroße Partikel, fast immer von Ausblühungen durchsetzt)

- Ausbrüche

- Ausbrüche
(scherbiges Ausbrechen von locker gewitterten Gesteinspartien)
- Abbröckeln
(Ausbrechen locker gewitterter Gesteinspartien)
- Abplatzungen
(Abplatzen von Gesteinsschalenstücken oder von Teilen verkrusteter Oberfläche)

Treuchtlinger Kalk

- Rauhwitterung
 - Aufrauhung
(Verlust der Schleifglätte bzw. der Oberflächenpolitur)
 - Abwitterung
(stärkerer Substanzverlust der Oberfläche, gleichmäßig über die Fläche verteilt)
 - Auswitterung
(starke Abwitterung in Kapillarsaumbereichen)
- Absanden
 - (Zerfall der Gesteinssubstanz in staub- und sandkorngroße Partikel; feine Abschlüferungen oder Abblättern von Gesteinsteilen; häufig mit Ausblühungserscheinungen einhergehend)

Frankendolomit

- Rauhwitterung
 - Auswitterung
(tiefergreifende Auswitterung im Kapillarsaumbereich)
- Absanden
 - Abmehlen
(Zerfall der Gesteinssubstanz in staubkorngroße Partikel, verbunden mit Ausblühungen)

Kalktuff

- Rauhwitterung
 - rauh abgewittert
(mehr oder weniger gleichmäßig rauh gewitterte Oberfläche)
 - abgewittert
(tiefer greifender Substanzverlust der Oberfläche; Ecken und Kanten von Werkstücken rund gewittert)
- Absanden
 - Abmehlen
(Zerfall der Gesteinssubstanz in staubkorngroße Partikel, verbunden mit Ausblühungen)
- Ausbrüche
 - Abbröckeln
(Zerfall der Gesteinssubstanz in mm- bis cm-große Partikel, verbunden mit Ausblühungen)

Granit (insbesondere Bayer. Wald-Granite)

- Rauhwitterung
 - rauhgewittert
(durch Abgrusen der Oberfläche rauh gewittert; meist im Bereich des Kapillarwassersaumes)
 - abgewittert
(durch Abschalen oder starkes Abgrusen der Oberfläche intensiv rauh gewittert, insbesondere im Bereich des Kapillarwassersaumes)

- Absanden

- Abgrusen
(körniger Zerfall der Gesteinssubstanz in einzelne Mineralkörner; häufig in Verbindung mit Ausblühungen)

- Ausbrüche

- Abschalen
(allgemein: Ablösungen von Schalenbildungen im Bereich des Kapillarwassersaumes)
- Abplatzungen, Ausbrüche
(Ablösungen von Schalenbildungen oder Verkrustungen der Gesteinsoberfläche in Teilstücken jeweils größeren Ausmaßes)
- Abbröckeln
(Ablösungen von Schalenbildungen oder Verkrustungen in Form von cm-großen Einheiten; häufig in Verbindung mit Ausblühungen)
- Abblättern, Abschuppen
(Ablösungen von Schalen oder Verkrustungen in Form von mm- bis cm-großen, meist nur 1 Mineralkornschicht dicken Partien; oft in Verbindung mit Ausblühungen)

Bayerische Nagelfluh (insbesondere Brannenburger Nagelfluh)

- Rauhwitterung

- rauhgewittert
(durch Partikelverlust der bearbeiteten Oberfläche)
- abgewittert
(stärkerer Materialverlust der bearbeiteten Oberfläche; rundgewitterte Ecken und Kanten; Auswitterung im Bereich des Kapillarwassersaumes)

- Absanden

- (Zerfall des Kornverbandes durch lockeres Ausfallen von Sand- und Kieskornpartikeln; "Mürbe"werden von Teilbereichen des Gesteins)
- Abmehlen
(Zerfall der Gesteinssubstanz einzelner Gerölle in staubkorngroße Partikel, meist verbunden mit Ausblühungen)

Ceppo-Nagelfluh

- Absanden

- Abmehlen
(Zerfall der Gesteinssubstanz einzelner Gerölle in staubkorngroße Partikel; immer verbunden mit Ausblühungen)

Sandstein (alle Arten)

- Rauhwitterung

- rauhgewittert
(Partikelverlust der Oberfläche)
- abgewittert
(stärkerer Materialverlust der Oberfläche; rundgewitterte Ecken und Kanten von Werkstücken; Auswitterungen im Bereich des Kapillarwassersaumes; Rauhwitterung durch Ablösen von Schalenbildungen oder Verkrustungen)

- Absanden

- (Zerfall des Kornverbandes durch lockeres Ausfallen von Sandkornpartikeln; "Mürbe"werden von Teilbereichen des Gesteins)

- Ausbrüche

- Abschalen
(allgemein: Ablösung von Schalenbildungen im Bereich des Kapillarwasser-saumes)
- Abplatzungen
(Ablösen von Schalenbildungen oder Verkrustungen der Gesteinsoberfläche in Teilstücken jeweils größeren Ausmaßes)
- Abbröckeln
(Ablösungen von Schalenbildungen oder Verkrustungen in Form von mm- bis cm-großen Einheiten).

Die nicht eigens aufgeführten Carbonatgesteine Travertin, Knollenkalke, Untersberger Kalk, Wallenfels Kalk und Solnhofener Kalk zeigen Verwitterungsformen, die denjenigen der beschriebenen Kalke in etwa entsprechen. Die übrigen Kristallingesteine Serpentinit, Gneise und kristalline Schiefer, Basalt-Tuff und Trachyt-Tuff weisen Auswitterungen, Abmehlen, Abgrusen, Abbröckeln und Abschilferungen, häufig in Verbindung mit Ausblühungen, auf.

Mit der Klassifizierung der im Kartiertext aufgezeichneten Beobachtungen in die 4 Schadenskategorien: 'Nur Ausblühungen', 'Rauhwitterung', 'Absanden' und 'Ausbrüche' wird es möglich, die Gesteinsarten hinsichtlich ihres qualitativen Verwitterungsverhaltens miteinander zu vergleichen. In Tabelle 47 sind die Häufigkeiten der beobachteten Schadensformen den einzelnen Gesteinsarten zugeordnet.

Insgesamt wurden 405 Schadenssituationen an den 245 von Schäden betroffenen Gebäuden verzeichnet.

Während in Tabelle 45 die jeweils stärkste Schadensausprägung (insgesamt 273 Nennungen) pro Gesteinsart und Vorkommen gewertet wurde, erfolgt nun die Aufgliederung nach Schadensarten pro Gesteinsart und Vorkommen, wodurch sich die Summenzahl von 405 Schäden ergibt.

Zur Hälfte setzt sich die Schadenszahl aus den verschiedenen Erscheinungen der 'Rauhwitterung', zur anderen Hälfte etwa gleichmäßig aus 'Absanden', 'Ausbrüchen' und 'nur Ausblühungen' zusammen. Bei 50 % der Schadensbilder waren zum Zeitpunkt der Kartierung Ausblühungen sichtbar.

Ausblühungen

Bei den klastischen Sedimentgesteinen liegt der Anteil der mit Ausblühungen einhergehenden Schadensformen mit 39 % (nimmt man die Ceppo-Nagelfluh aus, sogar mit nur 31 %) erheblich unter dem vergleichbaren Anteil bei den Carbonaten (59 %) und den Kristallingesteinen (53 %). Der Grund dafür mag darin liegen, daß sich Ausblühungssalze im Porenraumgefüge von klastischen Sedimenten leichter ausbreiten und verstecken können, während sie bei den dichten Carbonat- und Kristallingesteinen gezwungen sind, sichtbar an der Oberfläche zu kristallisieren.

Betrachtet man die Schadensspektren der einzelnen Gesteinsarten, so fällt auf, daß die dichten Carbonatgesteine - Donaukalk, Treuchtlinger Kalk, Frankendolomit und auch Ceppo-Nagelfluh - sowie die Kristallingesteine mit Ausnahme der Granite allgemein hohe Anteile an Ausblühungsbesatz ohne eigentliche Gesteinschäden aufweisen. Bei der heterogenen Struktur des Muschelkalks dagegen führt ein Salzbefall offenbar alsbald zum Aufbrechen der Oberfläche und zur Entwicklung fortgeschrittener Schadensformen.

Bei den Graniten und auch beim Kalktuff mit jeweils wenig Ausblühungsbefall sind die Gesteinsvorkommen und die feststellbaren Schäden meist bereits älteren Datums, der Prozeß der Abwitterung scheint in vielen Fällen bereits zum Stillstand gekommen zu sein. Gebäuderenovierungen und Straßenbaumaßnahmen haben in der Zwischenzeit den Wasser- und Salznachschub weitgehend reduziert.

Ein entscheidender Einfluß des Gesteinsmaterials auf die Intensität und Häufigkeit des Ausblühungsbefalls ist nicht festzustellen. Die Carbonatgesteine weisen gegenüber den Kristallingesteinen einen nur leicht höheren Anteil an Ausblühungsbeteiligungen auf, der sich durch die Reaktionsfähigkeit der Carbonatmineralien mit Schwefelsäure erklären läßt (vgl. auch Abschnitt 6.2.5.).

	nur Ausblühungen		Rauh- witterung		Absanden		Ausbrüche		Gesamtzahl		davon mit Ausblühungen	
		(%)		(%)		(%)		(%)		(%)		(%)
Muschelkalk	8	7	63	56	17	15	24	22	112	100	52	46
Donaukalk	15	31	24	49	5	10	5	10	49	100	39	80
Treuchtlinger Kalk	6	25	14	58	4	17	-	-	24	100	18	75
Kalktuff	-	-	14	88	1	6	1	6	16	100	6	38
Frankendolomit	6	67	2	22	1	11	-	-	9	100	9	100
Übrige Carbonate	3	18	9	53	1	6	4	23	17	100	10	59
Granite	6	9	34	51	6	9	21	31	67	100	31	46
Übrige Krist.-Gest.	5	50	1	10	2	20	2	20	10	100	10	100
Bayer. Nagelfluh	3	5	25	44	29	51	-	-	57	100	14	25
Ceppo Nagelfluh	4	57	-	-	3	43	-	-	7	100	7	100
Sandsteine	4	11	19	51	9	24	5	14	37	100	18	49
Zusammen	60	15	205	51	78	19	62	15	405	100	214	53
Carbonatgesteine	38	17	126	55	29	13	34	15	227	100	134	59
Kristalline Gesteine	11	14	35	46	8	10	23	30	77	100	41	53
Klastische Gesteine	11	11	44	43	41	41	5	5	101	100	39	39

Tab. 47: Schadensformen durch Ausblühungssalze an verschiedenen Gesteinsarten

Rauhwitterung

Einen überproportional hohen Anteil an rauhgewitterten Werkstücken zeigen die meist älteren und renovierten Vorkommen des Kalktuffes. Unterrepräsentiert ist diese Salzverwitterungsform beim Frankendolomit und bei den silikatischen Kristallgesteinen (mit Ausnahme der Granite), bei denen beiden der Ausblühungsbesatz dominiert.

Bei den insgesamt etwa 50 % rauhgewitterten Vorkommen sind 2 Phänomene zu unterscheiden: Zum einen erscheinen Gesteine mit kurzer Expositionsdauer bzw. bei gering intensivem Salzangriff 'rauh' gewittert, wenn allein die äußeren Mineralkörner verloren gehen und der eigentliche Vorgang des 'Absandens' selbst nicht erkennbar ist. Zum anderen wurden Gesteine als 'rauhgewittert' eingestuft, die einen intensiven Schadensprozeß bereits miterlebt haben und bei denen die äußere Gesteinsschicht weitgehend abgetragen ist.

Absanden

Hier ergeben sich bei den einzelnen Gesteinsarten die größten Abweichungen von dem mittleren Schadensanteil in Höhe von 19 %.

Bei den Klastiten ist - strukturbedingt - das 'Absanden' die Hauptabwitterungsform. Durch intensiven Salzangriff wird häufig aber auch das Gefüge der Carbonate in sand- und schluffkorngroße Partikel zerlegt. Bemerkenswert ist die relativ geringe Zahl abgrusender Granite als Folge der für viele Granite typischen Schalenverwitterung.

Ausbrüche

Ausbrüche sowie Abplatzungen sind vor allem bei den Graniten im Zuge der Schalenablösungen zu beobachten; außerdem beim Muschelkalk, dessen grobcalcitische Schillpartien durch Auswittern der feinkörnigen Matrix leicht als scherbige Stücke abgestoßen werden.

6.2.3. Schadensintensitäten

Um die Schwere der einzelnen Salzschäden mit in die Auswertungen einbeziehen zu können, wurden die Kartierbeobachtungen in die 3 Kategorien gefaßt: 'schwache Schäden', 'stärkere Schäden', 'starke Schäden'. Folgende Kriterien wurden zugrunde gelegt:

'schwache Schäden'

- Nur Ausblühungen

Helle Flecken; helle Säume; helle Ausblühungen; Ausblühungen, die entweder in geringer Intensität erscheinen oder nur Teilflächen geringer Ausdehnung einnehmen.

- Rauhwitterung

Angewittert, leicht raugewittert. Rauhwitterung und Anwitterung von Teilflächen geringen Ausmaßes.

- Absanden

Leichtes (rauhes) Absanden, leichtes Abgrusen; Abmehlen; rauhes, mürbes oder bröckeliges Absanden; (mürbes) Abgrusen.

- Ausbrüche

Abblättern von wenig ausgedehnten Teilbereichen eines Werkstückes; kleine Ausbrüche; Anbrüche; Ausplatzungen und Abplatzungen von Verkrustungen, deren Ausmaß im Verhältnis zur Werkstückgröße gering ist.

'Stärkere Schäden'

- Nur Ausblühungen

Deutlich sichtbare Ausblühungen.

- Rauhwitterung

Rauhe Abwitterung; Auswitterung; löcherige Auswitterung. Starke Auswitterung kleinerer Teilbereiche einer Werksteinfläche.

- Absanden

Abmehlen; rauhes und tiefer reichendes Abmehlen; Absanden; Abgrusen.

- Ausbrüche

Feines Abschalen; Abbröckeln; Abschuppen; Abschilfern; Abblättern; Ausbrüche; Abplatzungen; stärkere schalige Abplatzungen.

'Starke Schäden'

- Nur Ausblühungen

Intensive Ausblühungen

- Rauhwitterung

Starke Auswitterung; starke und tiefe Abwitterung; tiefreichend zerfallenes Gestein.

- Absanden

Starkes Abmehlen; tiefreichende und starke Absandung; starkes Abgrusen; tiefreichender Gesteinszerfall.

- Ausbrüche

Starkes Abbröckeln; Bröckelzerfall; starke Abschilferung; starke und tiefreichende Ausbrüche; intensive Schalen- und Krustenabplatzungen.

In den Tabellen 48, 49 und 50 sind die Häufigkeiten der auf diese Weise kategorisierten Schäden aufgezeichnet. Zusätzlich wurden jeweils gesondert die Zahlen der Schäden in der Umgebung der Gebäudeeingänge aufgeführt, da bei ihnen der Streusalzangriff am stärksten ist und es dort bevorzugt zu schweren Schädigungen kommen dürfte.

	Gesamtzahl der Schäden		schwache Schäden		stärkere Schäden		starke Schäden	
		(%)	Gesamt-zahl	davon Eingänge	Gesamt-zahl	davon Eingänge	Gesamt-zahl	davon Eingänge
nur Ausblühungen	57	13	36	9	18	4	3	3
Rauhwitterung	212	50	88	19	98	31	26	9
Absanden	112	26	18	5	64	21	30	7
Ausbrüche	45	11	19	3	21	12	5	2
Zusammen	426	100	161	36	201	68	64	21
davon mit Ausblühungen	220	52	66	20	119	46	35	13

Tab. 48: Intensitäten der verschiedenen Salzschadensformen - absolute Zahlen

Gezählt wurden die jeweils schwersten Schäden pro Gebäude und Schadensart. Unterschiede der Gesamtzahlen gegenüber den Tabellen 45 und 47 erklären sich durch die jeweils anders gearteten Zählweisen.

Tabelle 48 enthält die absoluten Werte der Auszählung; Tabelle 49 die relativen Häufigkeiten bezogen auf die Schadensformen in den Kategorien 'schwacher', 'stärkerer' und 'starker' Schäden; Tabelle 50 schließlich die relativen Häufigkeiten in bezug auf die verschiedenen Verwitterungsformen.

Abbildung 37 gibt in graphischer Darstellung die in Tabelle 49 aufgeführten Werte der relativen Häufigkeiten wieder. Lediglich bei der Erscheinungsform des

	Gesamtzahl der Schäden		schwache Schäden		stärkere Schäden		starke Schäden	
		(%)	Gesamt-zahl	davon Eingänge	Gesamt-zahl	davon Eingänge	Gesamt-zahl	davon Eingänge
nur Ausblühungen	57	13 %	22 %	25 %	9 %	6 %	5 %	14 %
Rauhwitterung	212	50 %	55 %	53 %	49 %	46 %	40 %	43 %
Absanden	112	26 %	11 %	14 %	32 %	30 %	47 %	34 %
Ausbrüche	45	11 %	12 %	8 %	10 %	18 %	8 %	9 %
Zusammen	426	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
davon mit Ausblühungen	220	52 %	41 %	56 %	59 %	68 %	55 %	62 %

Tab. 49: Schadenshäufigkeiten in bezug auf die Verwitterungsformen in den verschiedenen Intensitätsklassen

	Gesamtzahl der Schäden		Schadensklassen			schwache Sch.		stärkere Sch. davon Eing.		starke Sch. davon Eing.	
			schw.	stärk.	stark	Anzahl	davon Eing.	Anzahl	davon Eing.	Anzahl	davon Eing.
nur Ausblühungen	57	100 %	63 %	32 %	5 %	36	25 %	18	22 %	3	100 %
Rauhwitterung	212	100 %	42 %	46 %	12 %	98	22 %	98	32 %	26	35 %
Absanden	112	100 %	16 %	57 %	27 %	18	28 %	64	33 %	30	23 %
Ausbrüche	45	100 %	42 %	47 %	11 %	19	16 %	21	57 %	5	40 %
Zusammen	426	100 %	38 %	47 %	15 %	161	22 %	201	34 %	64	33 %
davon mit Ausblühungen	220	100 %	30 %	54 %	16 %	66	30 %	119	39 %	35	37 %

Tab. 50: Schadenshäufigkeiten in bezug auf die Intensitäten der verschiedenen Schadensformen

'Absandens' bestehen größere Unterschiede zwischen den Häufigkeiten 'schwacher', 'stärkerer' und 'starker' Schäden. 'Schwache' Absandungsschäden treten relativ selten auf, 'stärkere' und besonders die 'starken' Schäden kommen in größerer Häufigkeit vor.

Die Situation an den Eingangsbereichen (Tab. 49) weist keine wesentlichen Abweichungen gegenüber der insgesamt an den Sockelbereichen herrschenden Häufigkeitsverteilung der Schadensformen auf.

Die in bezug auf die Intensitäten der Verwitterungsformen berechneten Häufigkeitswerte aus Tab. 50 sind in Abb. 38 dargestellt. Ausblühungserscheinungen wurden in der Mehrzahl der Fälle als 'schwache' Schäden gewertet; sie sind ja

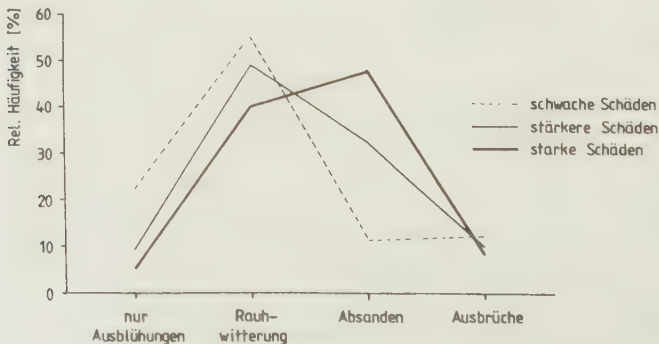


Abb. 37: Schadenshäufigkeiten im Spektrum der Schadensformen (vgl. Tab. 49)

zunächst nicht mit eigentlichen Gesteinsschäden verbunden. 'Stärkere' Ausblühungserscheinungen sind solche, die sehr intensiv und/oder vergleichsweise weitflächig verbreitet vorkommen. Bei den 'starken' Ausblühungen sind Übergänge zum Absanden (Abmehlen) bereits vorhanden.

In Abb. 38 ist erkennbar, daß 'Absandungen' häufiger mit 'stärkeren' und 'starken' Schäden in Verbindung stehen, als es für die 'Rauhwitterung' oder die 'Ausbrüche' der Fall ist.

Betrachtet man in Abb. 39 die Situation an den Eingängen im Vergleich zu den Sockelbereichen insgesamt (vgl. Abb. 38), so zeigt sich, daß die Schadensformen allgemein stärker und intensiver ausfallen, als es normalerweise im Sockelbereich der Fall ist. Grund dafür ist die winterliche Straßensalzung der Zugangswege zu den Gebäuden sowie das Einschleppen von salzhaltigem Schneematsch durch den Fußgängerverkehr.

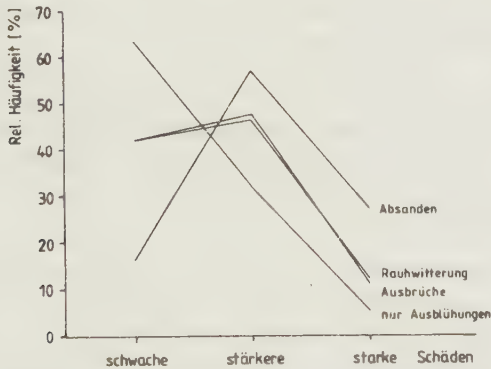


Abb. 38: Häufigkeiten der Schadensformen in den 3 Intensitätsklassen (vgl. Tab. 50)

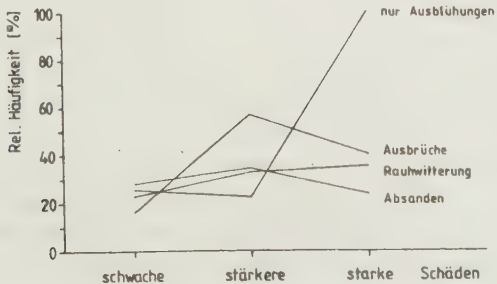


Abb. 39: Schadensanteile in der Nähe von Gebäudeeingängen, gemessen an den Gesamtschadenszahlen im Sockelbereich (vgl. Tab. 50)

6.2.4. Expositionsrichtung

Richtungsabhängige Verwitterungsfaktoren, welche für die Salzverwitterung eine Rolle spielen könnten, sind:

- Die Luv- und Leeseiten der Regenwindrichtung
(auf den Luvseiten Abspülung von Verschmutzungen und Salzen, gleichzeitig aber auch Bereitstellen von Regennässe für die Versorgung von Kapillarwassersäumen; auf den Leeseiten Akkumulation von Verschmutzungen und Salzen),
- die Insolationserwärmung,
die zum häufigen und intensiven Austrocknen der nach Süden und Westen exponierten Fassadenflächen beiträgt und somit die Salzverwitterung beschleunigen kann.

Mit der Zuordnung der quantifizierten Schadensbeobachtungen zu den Expositionen der von Ausblühungsschäden befallenen Fassadenflächen und dem Vergleich mit den Expositionen des Gesamtbestandes an Sockelgesteinen kann überprüft werden, ob und in welchem Ausmaß richtungsabhängige Verwitterungswirkungen tatsächlich Einfluß auf die Schadensbildung nehmen.

In Tabelle 51 sind die Häufigkeiten der Expositionen (= Normalenrichtungen auf den Gebäudeflächen) all derjenigen Fassadenflächen in 15°-Schritten aufgezeichnet, in deren Sockelbereich Naturwerksteine (auch als Türgewände oder Portalteile) verbaut vorkommen; dazu die Expositionshäufigkeiten der von Salzschäden betroffenen Sockelstrecken.

Für die weitere Auswertung wurde eine Wichtung der Schäden nach dem Schema: 'schwach' = 0,5x; 'stärker' = 1 x; 'stark' = 2 x getroffen.

Abbildung 40 zeigt die Ergebnisse der Tabelle in Form einer Richtungsrose, bei der die Häufigkeiten der gewichteten Schäden gegen die Gesamthäufigkeiten der Vorkommen in 30°-Schritten aufgetragen wurden. Man erkennt eine leicht überproportionale Häufung von Schädigungen an ostorientierten, eine geminderte Schadenshäufigkeit an den nach Westen exponierten Fassaden.

Tabelle 52 bringt eine Gegenüberstellung der zusammengefaßten Werte der 4 Sektoren des Gradkreises, die nochmals verdeutlicht, daß die nach Westen orientierten Flächen unterdurchschnittlich viele Salzschäden aufweisen (= auswaschende Wirkung des Schlagregens und Ablaufwassers), die nach Osten und Süden gerichteten Seiten dagegen häufiger mit Salzschäden behaftet sind (= Akkumulation von Salzen auf der regengeschützten Ostseite; oftmaliges rasches und vollständiges Austrocknen der Gesteine durch die Insolationsbestrahlung auf die Südseiten, dadurch häufiges Aus- und Umkristallisieren der Salze).

Eine wesentlich differenziertere Darstellung der Situation ergibt sich, wenn man die Abweichungen der Einzelvergleiche zwischen den Schadensrichtungen und den Zahlen der Vorkommen vom mittleren Wert der Schadenshäufigkeit (hier 26 %) über den Großkreis hinweg in 15°-Schritten aufzeichnet (Abb. 41). Um die Struktur der Verteilung deutlicher hervortreten zu lassen, wurde zweimal ein gleitendes Mittel über je 3 Einzelwerte berechnet (vgl. Tab. 51).

In Abb. 41 zeigt sich nun eine überdurchschnittliche Häufung von Schäden im Bereich Nordost bis Südwest, unterdurchschnittlich viele Schäden finden sich in den Gegenrichtungen Südwest bis Nordost. Für diesen Kurvenverlauf können zunächst die in München vorherrschenden Westwindrichtungen verantwortlich gemacht werden, die an Westfassaden für das Ausspülen der Salze sorgen, im Osten durch die fehlende Ausspülung die Salzakkumulation und damit die Schadensentwicklung fördern. Das kleinere Schadensmaximum um Süd geht ganz offensichtlich

Sektoren (°)	Anzahl aller Sockel- verkl.	Zahl der Salz- schäden	Schadensklassen			Wertung der Schäden	proz. Anteil (%)	glei- tendes Mittel (%)	Diffe- renz zu 26% (%)
			schw.	stärk.	stark				
0- 15	53	6	1	3	2	7,5	14	19	- 7
15- 30	203	57	16	29	12	61	30	20	- 6
30- 45	26	8	3	5	-	6,5	25	21	- 5
45- 60	15	2	2	-	-	1	7	25	- 1
60- 75	18	5	2	2	1	5	28	32	6
75- 90	8	3	-	1	2	5	63	41	15
90-105	49	18	9	3	6	19,5	40	43	17
105-120	144	52	14	27	11	56	39	38	12
120-135	31	12	5	6	1	10,5	34	32	6
135-150	39	8	2	6	-	7	18	30	4
150-165	32	9	2	4	3	11	34	31	5
165-180	15	7	2	5	-	6	40	32	6
180-195	50	13	4	7	2	13	26	31	5
195-210	181	56	22	25	9	54	30	28	2
210-225	27	10	6	4	-	7	26	25	- 1
225-240	14	4	2	2	-	3	21	21	- 5
240-255	32	4	1	1	2	5,5	17	18	- 8
255-270	13	2	2	-	-	1	8	17	- 9
270-285	44	8	-	5	3	11	25	20	- 6
285-300	160	45	14	24	7	45	28	21	- 5
300-315	48	11	7	4	-	7,5	16	21	- 5
315-330	24	5	3	2	-	3,5	15	19	- 7
330-345	34	9	4	2	3	10	29	18	- 8
345-360	9	1	1	-	-	0,5	6	17	- 9
	1269	355	124	167	64			Mittel- wert: 26%	

Tab. 51: Schadenshäufigkeiten in den einzelnen Fassadenexpositionen

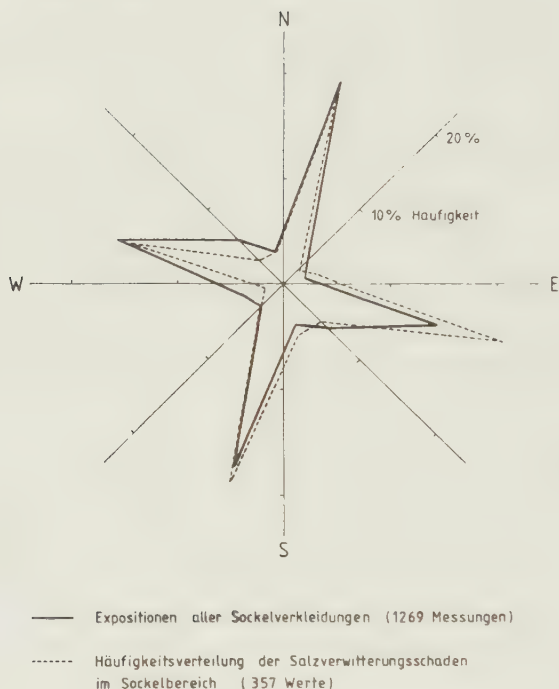


Abb. 40: Richtungsrosen der natursteinverkleideten und der mit Salzschäden behafteten Sockelstrecken

Vorkommen von Naturwerksteinen im Sockelbereich			Salzverwitterungsschäden im Sockelbereich			
Sektor (°)	Anzahl der Vorkommen	(%)		Wichtung der Schäden (%)		Sektor (°)
0- 90	323	26	Westwind-abgewandte Richtungen	24	86,0	0- 90
90-180	310	24	Insolationsrichtungen	31	110,0	90-180
180-270	317	25	Westwind-richtungen	23	83,5	180-270
270-360	319	25		22	77,5	270-360
	1269	100		100	357,0	

Tab. 52: Häufigkeiten von Salzschäden in Abhängigkeit von den Fassadenexpositionen

auf die trocknende, den kapillaren Wasserdurchsatz und die Salz-Kristallisationsvorgänge beschleunigende Insulationswirkung zurück.

In Abb. 42 sind die Häufigkeitsverteilung der bei Niederschlagsereignissen vorherrschenden Windrichtungen und diejenige der Dauer der jährlichen, astronomisch höchst möglichen Insulationsbestrahlung über den Gradkreis hinweg aufgetragen. Setzt man diese beiden Kurvenverläufe im Sinne der bisher gegebenen Erklärungen zusammen, so entsteht in Abb. 43 ein Kurvenzug, der fast identisch ist mit demjenigen in Abb. 41.

Ausgangspunkt für die Konstruktion in Abb. 43 ist die um 180° verschobene Regenwindrose. Hiermit wird das Schadensmaximum im Osten festgelegt. Dazu gezählt wurden die Häufigkeiten der Insulationsbestrahlung, die ja ebenfalls eine Verstärkung der Schadentätigkeit zur Folge hat. Schließlich wurde das westliche Regenwindmaximum, das schadensmindernd wirkt, subtrahiert.

Eine Erklärung findet auch die Zäsur zwischen dem östlichen Schadensmaximum und dem zweiten, kleineren südlichen Maximum in Abb. 41. Während rechnerisch die Insulationsbestrahlung gleich lange auf die südost- wie auf die südwestgerichteten Fassadenflächen einwirkt, ist der Erwärmungseffekt für die Südwestseiten ungleich höher, da die am Nachmittag angestiegenen Lufttemperaturen bereits zur Austrocknung und Erwärmung der Fassade geführt haben. Daß sich die erhöhten Schadenszahlen nicht bis in den NW-Sektor hinein fortsetzen, liegt an der ab SW einsetzenden Spülwirkung des Niederschlagswassers.

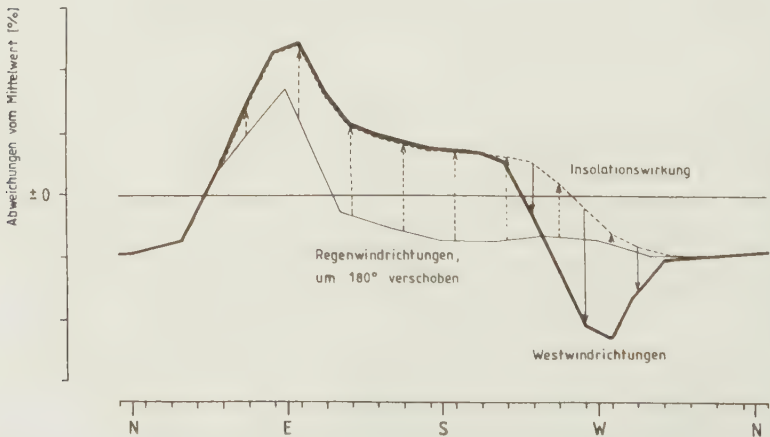


Abb. 43: Synthetischer Kurvenverlauf zur Expositionsabhängigkeit von Salzschaden

Ein Viertel der Natursteinvorkommen (26 %) an Gebäudesockeln ist mit Salzschäden behaftet. Im östlichen Sektor, wo sich Salze weitgehend ungestört etablieren können, reicht der Anteil der Schäden bis zu 50 % herauf. An den nach Westen orientierten Fassadenflächen wird er durch die abspülende Wirkung des Regens bis auf etwa 15 % gesenkt. Für den Gesamtbestand bedeutet dies, daß ohne die Schlagregenwirkung doppelt so viele Salzschäden vorhanden sein müßten. Durch Insolation werden auf den Südseiten der Gebäude zusätzlich schätzungsweise 5 % an Schäden verursacht.

6.2.5. Analysen von Ausblühungssalzen

Von einigen Gebäudesockeln mit Salzschäden wurden Proben locker gewitterter Gesteinsteile entnommen und auf Art und Menge der darin enthaltenen Salze hin untersucht. Dabei wurde der naßchemischen Analyse eines wäßrigen Lösungsauszugs der Vorzug gegeben vor der röntgenographischen Analyse, um die beteiligten Salz-Ionen möglichst vollständig zu erfassen.

Die Probenahmen und Analysen wurden im März 1984 nach der winterlichen Frostperiode mit Streusalzeinsatz durchgeführt. Probenahmestellen waren Gebäude mit vorwiegend 'starken' Salzschäden im Sockelbereich (Tab. 53).

Die in den Tabellen 54a und 54b wiedergegebenen Analysendaten in den Angaben 'mg' und 'mval' sind berechnet auf die jeweils aus den Proben ausgelösten und analysierten Salzmenen. In Tabelle 55 werden die analysierten Ionengewichtssummen mit den gravimetrisch bestimmten Salzgewichten verglichen.

Analog zur Klassifizierung von Grundwässern lassen sich aus den 'mval%-Angaben der Analysen 2 Typen von Ausblühungssalzen ableiten:

Proben S1-S 7	NaCl-CaSO ₄	-Typ
Proben S9-S 12	MgSO ₄ -(CaSO ₄)	-Typ
Probe S8	Mischtyp	

Den Schadensentwicklungen der Proben S1-S 7 liegen günstige Durchfeuchtungsbedingungen am Werkstück und ein massiver Streusalzangriff durch NaCl zugrunde. Auffällig ist der in allen NaCl-haltigen Proben immer auch hohe Gehalt an Gips. Er liegt offenbar darin begründet, daß sich bei Kombination beider Salze deren Löslichkeiten gegenseitig erhöhen. Während NaCl ohnehin sehr leicht löslich ist, eine weitere Erhöhung ohne Bedeutung bleibt, wirkt sich die Anwesenheit von NaCl für die Löslichkeit des Gipses entscheidend aus. Gips ist in reiner Lösung bis zu einer Menge von etwa 2 g/l löslich. Zusammen mit NaCl kann die Löslichkeit auf das 3- und 4-fache ansteigen. Die Herkunft des Gipses ist in

Tab. 53: Probenahmen an verwitterten, mit Ausblühungssalzen durchsetzten Naturwerksteinen

-
- | | |
|------|--|
| S 1 | Hopfisterstraße; Alter Hof - Nordseite
<u>Brannenburger Nagelfluh</u> als Sockelverkleidung, an Granitstufen angrenzend.
Starkes Absanden; 1 Platte bereits "durch"gewittert. |
| S 2 | Hopfisterstraße; Alter Hof - Nordseite
<u>Brannenburger Nagelfluh</u> als Sockelverkleidung der nördlichen Zufahrt.
Absandungen im oberen, bis etwa 1 m hochreichenden Kapillarwassersaum. |
| S 3 | Hartmannstraße 4 ("Austrian Airlines") - Ostseite
<u>Brannenburger Nagelfluh</u> , Sockelstücke zwischen den Schaufenstern.
Starkes Absanden im unteren Bereich. |
| S 4 | Hartmannstraße 8 (Restaurant "Schwarzwälderhaus") - Westseite
<u>Muschelkalk-Blaubank</u> , Eingangsgewände
Intensiv ausgebrochene Oberfläche. |
| S 5 | Herzog-Rudolf-Straße 1 - Ostseite
<u>Treuchtlinger Kalk</u> , Erdgeschoß-Fassade.
Bis in 0,4 m Höhe starkes Abblättern der Oberfläche mit Ausblühungen. |
| S 6 | Am Platzl 9 ("Hofbräuhaus") - Westseite
<u>Granit</u> , Sockelgestein.
Beulenartiges Aufwölben der schalig abgelösten Granitoberfläche. |
| S 7 | Tal 48 - Ostseite
<u>Gneis</u> , Sockelplatten unter Vitrinensockel.
Stark abschilfernde Oberfläche mit Ausblühungen. |
| S 8 | Max-Joseph-Platz; Nationaltheater - Südseite
<u>Donaukalk</u> , Sockelverkleidung.
In den Vitrinen-Nischen Ausbrüche und Bröckelzerfall bis in 0,4 m Höhe. |
| S 9 | Residenz-Ostseite; Allerheiligen-Hofkirche
<u>Regensburger Grünsandstein</u> , Fassadenverkleidung.
Starkes und tiefreichendes Absanden. |
| S 10 | Karlstraße 34; Kirche St. Bonifaz - Südseite |
| -12 | <u>Eltmanner Sandstein</u> ; Sockelverkleidung und Portalgewände in Arkadenvorbau.
Sehr starke Ausblühungen und tiefgreifende Zerstörungen der Sockelsteine
und unteren Gewändeplatten. |
| S 10 | Eingangsgewände rechts, unteres Reliefteil |
| S 11 | Eingangsgewände links, unteres Reliefteil |
| S 12 | Sockelverkleidung |
-

der Zusammensetzung des Luftstaubes gegeben, der im Umfeld der Gebäudesockel allgegenwärtig ist und hohe Gehalte an Gips enthält (vgl. Tab. 29). Daß gelöste Carbonatsubstanz der geschädigten Gesteine einen entscheidenden Beitrag zur Zusammensetzung der Ausblühungssalze liefern würde, ist nicht zu erkennen. Die Proben S6 (Granit) und S7 (Gneis) weisen gleiche und höhere Verhältnisse zwischen $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ und NaCl auf wie die carbonatreichen Gesteinsproben S1 - S5.

Die Proben S9 bis S12, untergeordnet auch S8, enthalten hohe Gehalte an Magnesiumsulfat, wohl in Form von Epsomit $\text{MgSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$, das im Bereich des Kapillarwassersaumes oder einer Kondenswasserdurchfeuchtung aus Mörtelstoffen ausgelöst

Tab. 54a: Chemische Analysen von Ausblüungssalzen stark verwitterter Werksteinproben (Proben S1 - S6)

	S 1			S 2			S 3			S 4			S 5			S 6		
	mg	mval	mval%	mg	mval	mval%	mg	mval	mval%	mg	mval	mval%	mg	mval	mval%	mg	mval	mval%
Ca ⁺⁺	28,9	1,44	29	12,5	0,62	22	42,6	2,13	32	13,6	0,68	48	42,1	2,10	62	21,0	1,05	65
Mg ⁺⁺	2,0	0,16	3	2,7	0,22	8	3,4	0,28	4	1,2	0,10	7	3,6	0,30	9	1,2	0,10	6
Na ⁺	73,8	3,21	64	41,5	1,80	63	92,0	4,00	59	13,5	0,59	41	20,0	0,87	26	7,0	0,30	18
K ⁺	9,0	0,23	4	6,3	0,16	6	12,3	0,31	5	1,8	0,05	3	4,5	0,12	3	2,5	0,06	4
NH ₄ ⁺	0,2	0,01	-	0,8	0,04	1	0,6	0,03	-	0,2	0,01	1	0,2	0,01	-	2,1	0,12	7
HCO ₃ ⁻	9,2	0,15	3	10,7	0,18	6	9,2	0,15	2	9,2	0,15	10	6,1	0,10	3	6,1	0,10	6
SO ₄ ⁻⁻	63,0	1,31	29	21,0	0,44	16	50,0	1,04	16	31,0	0,65	45	120,0	2,50	70	44,0	0,92	58
Cl ⁻	97,8	2,75	61	71,0	2,00	69	184,0	5,18	79	20,0	0,56	39	27,0	0,76	21	11,0	0,31	19
NO ₃ ⁻	19,1	0,31	7	16,3	0,26	9	12,3	0,20	3	5,3	0,09	6	12,8	0,21	6	13,6	0,22	14
NO ₂ ⁻	0,02	-	-	0,02	-	-	0,04	-	-	0,02	-	-	-	-	-	0,09	-	-
PO ₄ ⁻⁻⁻	/	/	/	0,45	0,01	-	0,01	-	-	0,09	-	-	0,14	-	-	1,4	0,04	3
Summe	303,0			183,3			406,5			95,9			236,4			110,0		
Kationen		5,05	100		2,84	100		6,75	100		1,43	100		3,40	100		1,63	100
Anionen		4,52	100		2,69	100		6,57	100		1,45	100		3,57	100		1,59	100
rel. Fehler*		5,5%			-0,9%			1,4%			-0,7%			-2,4%			1,2%	
N-Gehalt (mg/1 NO ₃ ⁻)	19,8			19,1			14,4			6,0			13,5			20,9		
Anteil der N-Verb. (Gew%)	6,4%			9,3%			3,2%			5,8%			5,5%			14,4%		

* Der relative Fehler errechnet sich aus: $\frac{\text{Summe K} - \text{Summe A}}{\text{Summe K} + \text{Summe A}} \cdot 100 \%$

- nicht nachgewiesen
/ nicht bestimmt

Tab. 54b: Chemische Analysen von Ausblühtungssalzen stark verwitterter Werksteinproben (Proben S 7 - S 12)

	S 7			S 8			S 9			S 10			S 11			S 12		
	mg	mval	mval%	mg	mval	mval%	mg	mval	mval%	mg	mval	mval%	mg	mval	mval%	mg	mval	mval%
Ca ⁺⁺	36,1	1,80	58	7,0	0,35	31	56,1	2,80	31	49,1	2,45	11	19,0	0,95	10	49,1	2,45	6
Mg ⁺⁺	3,0	0,25	8	1,8	0,15	13	68,1	5,60	61	247,6	20,36	88	106,4	8,75	88	411,6	33,85	89
Na ⁺	22,0	0,96	31	14,0	0,61	53	12,0	0,52	6	6,1	0,27	1	2,9	0,13	1	39,0	1,70	5
K ⁺	2,0	0,05	2	1,4	0,04	3	7,5	0,19	2	3,9	0,10	-	3,1	0,08	1	3,2	0,08	-
NH ₄ ⁺	0,45	0,03	1	-	-	-	0,28	0,02	-	0,6	0,03	-	0,2	0,01	-	1,3	0,07	-
HCO ₃ ⁻	6,1	0,10	3	3,0	0,05	5	12,2	0,20	2	9,15	0,15	1	6,1	0,10	1	9,15	0,15	1
SO ₄ ⁻⁻⁻	95,0	1,98	63	17,0	0,35	33	365,0	7,60	91	975,0	20,31	98	475,0	9,90	99	2000,0	41,67	99
Cl ⁻	35,0	0,99	31	22,0	0,62	58	9,0	0,25	3	2,0	0,06	-	-	-	-	1,0	0,03	-
NO ₃ ⁻	5,7	0,09	3	2,2	0,04	4	18,5	0,30	4	8,8	0,14	1	3,1	0,05	-	7,9	0,13	-
NO ₂ ⁻	-	-	-	0,14	-	-	0,09	-	-	/	/	/	/	/	/	-	-	-
PO ₄ ⁻⁻⁻	0,03	-	-	-	-	-	-	-	-	/	/	/	/	/	/	0,05	-	-
Summe	205,4			68,5			548,8			1302,3			615,8			2522,3		
Kationen	3,09		100	1,15		100	9,13		100	23,21		100	9,92		100	38,15		100
Anionen	3,16		100	1,06		100	8,35		100	20,66		100	10,05		100	41,98		100
rel. Fehler*	-1,1%			4,1%			4,5%			5,8%			-0,7%			-4,8%		
N-Gehalt (mg/l NO ₃ ⁻)	7,2			2,4			19,6			10,8			3,8			12,3		
Anteil der N-Verb.(Gew%)	3,0%			3,4%			3,4%			0,7%			0,5%			0,4%		

* Der relative Fehler errechnet sich aus: $\frac{\text{Summe K} - \text{Summe A}}{\text{Summe K} + \text{Summe A}} \cdot 100 \%$

- nicht nachgewiesen
/ nicht bestimmt

wurde. In Probe S8 (Nationaltheater) ist noch überwiegend, in S9 (Allerheiligen Hofkirche) untergeordnet Natriumchlorid mitbeteiligt. Die Proben S10 - S12 (St. Bonifaz) bestehen fast ausschließlich aus Mg- (und Ca-) Sulfaten.

Interessant ist die Feststellung, daß sich in allen untersuchten Proben Stickstoffverbindungen als Nitrat-, Nitrit- oder Ammoniumsalze nachweisen lassen. In den Tabellen 54a und 54b wurden die N-Gehalte der Salze einmal als NO_3^- ausgedrückt, und des weiteren die Gewichtsanteile der zusammenaddierten Stickstoffverbindungen berechnet. Nimmt man die Proben S10 - S12 aus, so bewegt sich der Anteil der stickstoffhaltigen Ionen an den Ausblühungssalzen zwischen 3 und 15 Gew.-%. Während früher Fäkalien eine Hauptquelle für Stickstoffsalze in Mauerwerken waren, entstammen die Stickstoff-Ionen heute vorwiegend den Autoabgasen. In die Sockelgesteine gelangen sie offenbar bevorzugt über das Schneeschmelzwasser, das hohe NO_3^- - und NO_2^- -Anreicherungen aufweisen kann (vgl. Tab. 36c) und über die Auslösung von rußhaltigem Straßenstaub, der ebenfalls nicht unbedeutliche Mengen an Stickstoffsalzen enthält (vgl. Tab. 29).

Die gravimetrisch bestimmten Salzgewichte der Proben (Gesamtgewicht der trockenen Probe minus Gewicht der trockenen Probe nach der Auslösung der Salze) stimmen im großen und ganzen mit den analytisch erfaßten Ionengewichtsmengen überein (Tab. 55). Größere Abweichungen ergeben sich lediglich bei den MgSO_4 -Typen (s.u.).

Die Wassergehalte der naturfeuchten Proben halten sich bei den NaCl-CaSO_4 -Typen unterhalb von 0,5 Gew.-%. Diese Wassermenge stammt - wie eine Überschlagsrechnung zeigt - nur zum geringen Teil aus der Entwässerung des Gipses ($\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$) zu Bassanit ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5 \text{H}_2\text{O}$) bei der Ofentrocknung mit 105 °C. Wie aus Röntgendiffraktometeraufnahmen ofentrockener Salzproben hervorgeht, wird ohnehin nur ein Teil des Gipses zu Bassanit umgewandelt. Die vollkommen entwässerte Form des Anhydrits ließ sich übrigens bei keiner einzigen Bestimmung nachweisen.

Bei den Proben S1 - S4 würde der Gewichtsverlust bei quantitativ zu Bassanit umgewandeltem Gips nur 0,04 - 0,07 % des trockenen Probengewichtes betragen. Bei diesen Proben liegt also der gravimetrisch bestimmte Wassergehalt adsorptiv angelagert an den Gesteins- und Salzmineralien vor. Einzig bei Probe S5 ist der Gipsgehalt hoch genug, um durch seine teilweise Entwässerung die Höhe des ermittelten Wassergehaltes erklären zu können.

Entscheidend höhere Wassergehalte sind bei den MgSO_4 -Typen festzustellen; bei den zur Hälfte (nach Wägung) aus Salz bestehenden Proben von St. Bonifaz (S10 - S12) erreichen sie bis zu 1/3 des Probengewichtes. Mg-Sulfat als Epsomit ($\text{MgSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$) gibt oberhalb von 68 °C 6/7 seines Kristallwassers ab und wird zu $\text{MgSO}_4 \cdot 1 \text{H}_2\text{O}$, was einen Gewichtsverlust um 44 % bedeutet.

	Probengewicht (g)	natürliche Feuchtigkeit (g)	Wassergehalt (%)	Salzgewicht (Abdampf- rückstand) (g)	Salzanteil (%)	Salzgewicht (analytisch erfaßt) (g)
S 1	55,96	0,13	0,2 %	/	0,5 %)*	0,30
S 2	18,09	0,08	0,4 %	/	1,0 %)*	0,18
S 3	30,83	0,15	0,5 %	/	1,3 %)*	0,41
S 4	15,37	0,02	0,1 %	/	0,7 %)*	0,10
S 5	8,19	0,02	0,2 %	0,26	3,2 %	0,24
S 6	/	/	-	0,14	-	0,11
S 7	/	/	-	0,21	-	0,21
S 8	23,21	0,02	0,1 %	0,07	0,3 %	0,07
S 9	40,00	0,44	1,1 %	0,74	1,9 %	0,55
S 10	3,74	1,02	27,3 %	1,81	48,4 %	1,30
S 11	1,52	0,45	29,6 %	0,72	47,4 %	0,62
S 12	4,23	1,66	39,2 %	3,00	70,9 %	2,52

)* Werte aus der analytisch erfaßten Salzmenge berechnet;

sonst aus dem Abdampfrückstand

/ Werte nicht bestimmt

Tab. 55: Wassergehalte und Salzanteile stark verwitterter und salzhaltiger Werksteinproben

Errechnet man diesen Gewichtsverlust für die analytisch bestimmten Mg- und die stöchiometrisch zugehörigen SO_4 -Mengen, so ergibt sich eine exakte Übereinstimmung mit den ausgewogenen Feuchtigkeitsverlusten durch die Ofentrocknung (Tab. 56).

Der Salzanteil der Proben (Salzgewicht/Trockenprobengewicht + Salz) hängt natürlich ab von der Art der Probenahme und dem Durchsetzungsgrad der Probe mit Ausblühungssalzen. Besonders hoch ist der Salzanteil bei den Proben von St. Bonifaz; berücksichtigt man, daß bei der Wägung die Entwässerung bereits stattgefunden hat, so kommt man für die naturfeuchten Proben noch zu etwas höheren Salzanteilen. Bei den übrigen Proben erreicht der Salzanteil häufig nicht einmal 1 Gew.-%, obwohl die Proben durchwegs aus stark salzgeschädigten Gesteinsbereichen stammen.

	gemessene Probenfeuchte (g)	berechneter Gewichtsverlust (g)
S 10	1,02	1,02
S 11	0,45	0,44
S 12	1,66	1,70

Tab. 56: Gemessener und berechneter Gewichtsverlust der Proben S 10 - S 12 bei der Entwässerung von Epsomit ($\text{MgSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$) zu Kieserit ($\text{MgSO}_4 \cdot 1 \text{H}_2\text{O}$)

6.3. Verwitterung des Muschelkalks

Das heute an den Gebäudefassaden der Stadt mit Abstand am häufigsten verbaute Gestein ist der Muschelkalk, dessen natürliche Vorkommen im Gebiet der Quaderkalkausbildung des Oberen Muschelkalks zwischen Würzburg und Rothenburg o.d.T. liegen.

Nach München exportiert und dort verbaut wurden vor allem 3 Gesteinsausbildungen:

- Der Kernstein aus millimeter- bis zentimetergroßen Schalenbruchstücken, die calcitisch gebunden sind. Das graue Gestein ist oft mit limonitfarbenen Schmitzen durchsetzt und erscheint im rauh abgewitterten Zustand luckig-porös.
- Die polierfähige Blaubank, bzw. Goldbank, bei der die calcitisch verfestigten Schillpartien ein mehr oder weniger fest miteinander verbundenes Gerüst darstellen, das ansonsten von feinkörniger, bereichsweise etwas mergeliger Kalkmatrix ausgefüllt ist. Diese verleiht dem Gestein ein bläulich-graues Aussehen; im Falle der Goldbank führen limonitische Beimengungen in der Kalkmatrix zu einer gelben bis rostbraunen Färbung.
Zwischen den Kernstein- und den Blaubankausbildungen existieren alle Arten von Übergängen.
- Der nur in Einzelfällen verbaute Schaumkalk aus feinkörnigem, gleichmäßig sortiertem, hellgrauem Schalenzerreißel.

Die Muschelkalk-Werksteine zeigen im großen und ganzen ein recht einfach zu überschauendes Verwitterungsverhalten: Rauhe Abwitterung der Oberflächen auf den Wetterseiten, schwarze Gipskrustenbildungen auf den wettergeschützten Flächen, dazu kleinteilig-scherbige Ausbrüche an den meist polierten Oberflächen von Blaubank- und Goldbankgesteinen.

Im Zuge einer Spezialkartierung an den Gebäudefassaden des Kreuzviertels (K) und des Graggenauer Viertels (G) wurden die Verwitterungserscheinungen an 131 Muschelkalk-tragenden Gebäuden registriert (Tab. 57) und auf ihre Abhängigkeiten vom Expositionsalter (6.3.2.) und der Expositionsrichtung (6.3.3.) hin untersucht.

Die aus Muschelkalk gefertigten Bauteile sind im wesentlichen flächige Fassadenverkleidungen, Verkleidungen der Sockelbereiche durch Platten oder Quader, Pfeilerverkleidungen, Portalteile, Tür- und Fenstergewände sowie Fensterbänke. An den 131 beschriebenen Gebäuden kamen an 24 Lokalitäten nur Tür- oder Fenstergewände, an 54 (auch) Sockelverkleidungen, 53mal (allein oder zusätzlich) Verkleidungen des Erdgeschosses und 28mal (allein oder zusätzlich) Verkleidungen der gesamten Fassadenfläche aus Muschelkalk vor.

Blaubank- und Kernstein-Varietäten sind zu etwa gleichen Teilen an den Vorkommen beteiligt, sowohl was die Gesamtzahl, als auch was die Aufgliederung nach verschiedenen Bauteilarten betrifft. Die zu den Blaubank-Gesteinen gezählte Goldbank fand 12 mal als Material für Teile der Erdgeschoßverkleidung Verwendung.

Tab. 57: Auszug aus der Spezialkartierung: Verwitterung des Muschelkalks

Kreuzviertel

K 14 Promenadeplatz 15 (1960)

Nordseite: Sockel: Kernstein - renoviert (gestockt)

Trotz Renovierung Dunkelung von oben und unten her auf die Sockelsteine greifend. Bei der Renovierung wurde äußere Gipsverkrustung abgetragen. In der Mitte des Sockels hellerer Saum. Von oberer Kante her kleinere helle Ablaufbahnen.

Z.T. lockere, ausbröckelnde Partien, die offenbar seit längerer Zeit bestehen; dahinter Schmutzansammlung.

K 14 Promenadeplatz 9 (1910)

Nordseite: Fassadenverkleidung: Kernstein-Quader (z.Z. in Renovierung)

Gesteine frisch gestockt. In Porenräumen Reste schwarzer Gipsverkrustung.

Ostseite: Fassadenverkleidung: Kernstein-Quader (z.Z. in Renovierung)

Ehemals dunkler Belag mit Netzstruktur auf renovierter (abgeschliffener) Oberfläche noch "durchscheinend" erhalten.

K 15 Hartmannstr. 8

Südseite: Sockel: Blaubank (poliert)

Allgemein leicht rauh gewittert; teils Schillausbrüche.

Von oben her netzartig dunkel; von unten her und an Wasserabläufen hell. Zur SW-Ecke hin stärkere Krustenbildung und ältere Ausbrüche, die schwarz verkrustet sind.

Fensterbänke: Blaubank (poliert)

Dunkel belegt. Schichtlagen und feinkörnige Matrixbereiche alt ausgewittert. Sonst blankpoliert durch ständige Berührung.

Westseite: Sockel: Blaubank (ehemals poliert)

Hell und rauh abgewittert. Bereichsweise starkes Auswittern der Oberfläche, Abbröckeln, Abmehlen.

Nach Norden hin von oben her zunehmende netzartige Dunkelung; unter Vorsprüngen dunkler Belag mit kleineren Ausbrüchen.

Tüргewände: Blaubank (poliert)

An nach Süden gerichteter Gewandeseite im unteren Bereich starke Salzschäden; Ausbröckeln mit Ausblühungen im Kapillarwassersaum.

K 15 Promenadeplatz 7 (1907)

Westseite: Große Sockelstücke: Kernstein (gestockt)

Vollständig braun-schwarz überkrustet.

Oberfläche vor der Verkrustung offenbar löcherig ausgewittert gewesen.

An Gebäudecke probeweise renoviertes Stück (gestockt): Frischer Muschelkalk-Kernstein mit limonitfarbenen Schmitzen.

Nordseite: Große Sockelstücke: Kernstein (gestockt)

Allgemein braun-schwarz überkrustet.

6.3.1. Verwitterungserscheinungen

Auf den Schlagregenseiten und in den Bahnen ablaufenden Regenwassers wittern die Muschelkalkoberflächen rauh aus. Eine erste Phase der 'Rauhen Abwitterung' (= "Mikrokarst") betrifft die feinkörnigen, manchmal schwach tonhaltigen Matrixmassen zwischen den calcitisch gefestigten Schillpartien, die besonders rasch aufgelöst und ausgespült werden. Bei den dichten, zur Blaubank-Ausbildung hin neigenden Varietäten werden die umkristallisierten, gröber körnigen Schalenstücke gegenüber der schneller abwitternden Matrix als Härtlinge reliefartig herauspräpariert. Die raugewitterten Gesteine des Kernsteins bleiben unter normalen Bedingungen mit etwas abgestumpften Formen lange Zeit ansehnlich und in der Substanz nicht ernsthaft angegriffen. Tieferer Auswitterungen ergeben sich entlang von tonreichen Styrolithenbahnen und natürlich im Bereich von Kapillarwassersäumen durch Salzkonzentrationen, die zum Abbröckeln und Absanden des Gesteins führen.

Blaubank- und Goldbankvarietäten des Muschelkalks sind eigentlich nur für den Gebrauch in Innenräumen geeignet und empfohlen; sie werden dessen ungeachtet aufgrund ihres ansprechenden Aussehens aber auch häufig in poliertem Zustand im Außenbereich zur Fassadenverkleidung benutzt. Schäden stellen sich denn auch rasch ein, zumal die empfindlichen Gesteine meist in relativ dünnen und dazu parallel zur Schichtfläche gesägten Platten verbaut werden. Die Abwitterung setzt auch hier zuerst an der feinkörnigen Matrixmasse an; diese wird herausgelöst, wodurch der Zusammenhalt der an der freien Werksteinoberfläche gelegenen Schillpartien mit dem Restgestein verloren geht und diese ausfallen. Es entsteht eine stark aufgerauhte, narbige Oberfläche, die sich je nach Zusammenhalt der grob-calcitischen Partien nach einer ersten Abwitterungsphase stabilisieren kann. Manchmal aber auch geht die Abwitterung weiter und erfaßt schließlich die gesamte Dicke einer Fassadenplatte. Besonders rasche und tiefe Ausbrüche an Blaubankgesteinen sind in Kapillarwasserbereichen, an stark bespülten Flächen entlang von Regenfallrohren sowie an den Vorderkanten und Unterseiten von Fensterbänken zu beobachten.

Abb. 44 zeigt die elektronenmikroskopische Aufnahme der Bruchfläche eines frischen, unverbaut gewesenen und unverwitterten Muschelkalkgesteins. Der Verband der Carbonatkörner ist dicht geschlossen und kompakt, die einzelnen Körner weisen scharfkantige, frische Kanten auf, chemische Lösungsspuren sind nicht vorhanden.

Abb. 45 Rauh gewitterte Blaubank-Oberfläche einer Probe der nach Westen exponierten Fassadenverkleidung Pacellistr. 1 (Verbaudatum 1955; bei der Probenahme 1983 seit 28 Jahren der Verwitterung ausgesetzt). Der quer durch das Bild verlaufende, dunkel erscheinende, grobkörnige Bereich ist Teil eines umkristallisierten Schalenbruchstückes, das sich

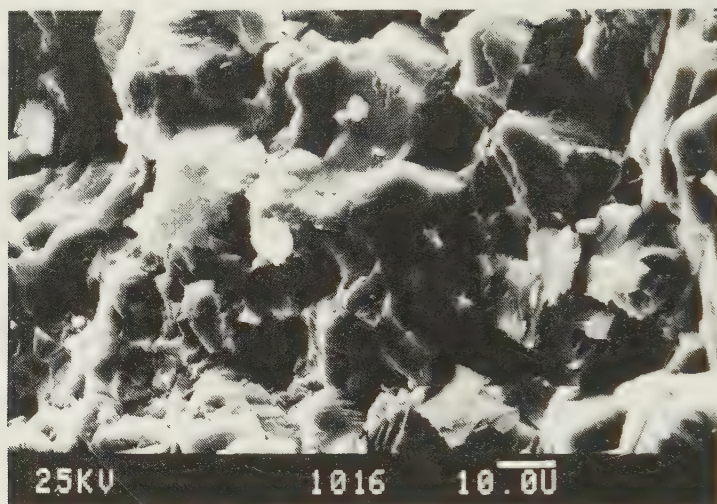


Abb. 44: REM-Aufnahme einer unverwitterten Muschelkalk-Bruchfläche

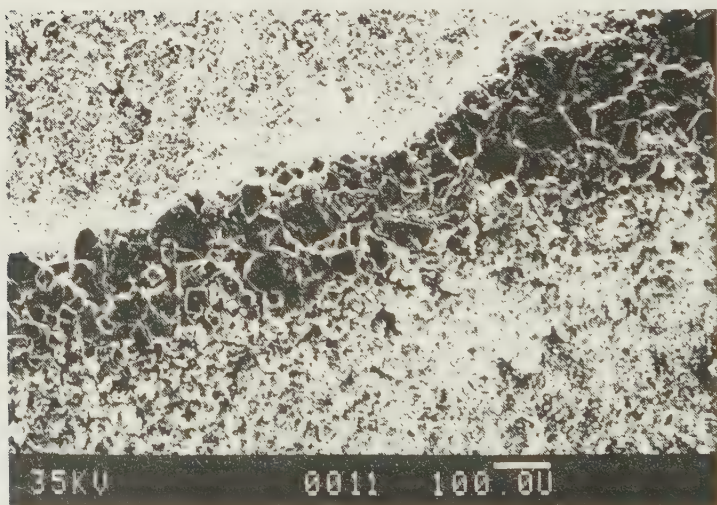


Abb. 45: REM-Aufnahme einer rauhgewitterten Muschelkalk (Blaubank)-Oberfläche (Pacellistraße 1)

durch selektive Abwitterung als Härtling über seine feiner körnige Umgebung erhebt. Das Korngefüge sowohl der feinen, wie auch der gröberen Partikel ist deutlich aufgelockert.

Dem Abwitern der Oberfläche durch Korn-für-Korn-Verluste geht offenbar eine Phase der Gefügelockerung voraus, hauptsächlich hervorgerufen durch chemische Anlösung der einzelnen Carbonatpartikel. Dabei sind die feineren Korngrößen aufgrund ihrer relativ größeren spezifischen Oberfläche stärker betroffen. Sicherlich spielen bei der Gefügelockerung daneben auch thermische und hygrische Bewegungsvorgänge eine Rolle.

Abb. 46 gibt einen vergrößerten Ausschnitt des feinkörnigen Bereiches in Abb. 45 wieder. Die hell beleuchteten, obersten Calcite haben sich bereits deutlich voneinander entfernt und deuten mit ihren oft leicht abgerundeten Kanten auf Lösungsverwitterung hin. Die weiter innen liegenden Teilchen weisen dagegen die ursprünglichen, noch annähernd scharfkantigen Formen auf.

Abb. 47 zeigt in gleicher Vergrößerung einen Ausschnitt aus dem gröber körnigen Schalenteil der Abb. 45. Auch hier sind die Kanten der Körner angerundet bis gerundet. In den Spalten zwischen den großen Calcitkristallen haben sich kleine, von anderer Stelle herbeitransportierte Carbonatpartikel festgesetzt.

Ebenfalls von der Westfassade des Gebäudes Pacellistr. 1 (Blaubank) stammen die Abbildungen 48 und 49. Das untersuchte Probenstück wurde nicht der freien Fassadefläche entnommen, sondern einem Bereich unterhalb einer vorkragenden Fensterbank, der im Zentrum eine schwarze Gipsverkrustung und randlich intensiv abgewitterte Flächen aufweist.

Abb. 48 zeigt Calcitkörner mit sehr deutlichen chemischen Lösungsspuren. Der rhomboedrische Kristallbau der Calcite ist herauspräpariert. Die mechanische Lockerung des Gefüges ist weniger weit fortgeschritten als bei den etwa gleich großen Partikeln der Abb. 47.

Abb. 49 vom gleichen Probenstück zeigt die Oberflächen von leicht narbig angelösten Calcitkörnern. In den Spalten zwischen den Körnern haben sich neugebildete Gipskristalle (nach EDAX-Analyse) eingenistet. Da das Auftreten derartiger Spalten zwischen den Gesteinspartikeln in gleicher Größenordnung auch ohne Salzerscheinungen möglich ist (Abb. 47), scheinen die Gipse im Bild selbst keine sprengenden Wirkungen ausgelöst zu haben, sondern lediglich aus der Spaltenfeuchtigkeit auskristallisiert zu sein.

(Eine weitere REM-Aufnahme dieses Probenstückes ist in Abb. 53 wiedergegeben.)

Die gegensätzliche Erscheinung zur 'Rauhen Abwitterung' ist die Gipskrustenbildung auf den vor auftretendem und ablaufendem Regenwasser geschützten Muschelkalkoberflächen. Die carbonatische Gesteinssubstanz scheint prädestiniert zu sein für die Ansiedlung neugebildeten Gipses. Einerseits kann der Krustengips aus der Reaktion der Schwefelsäure im Niederschlags- oder Kondenswasser

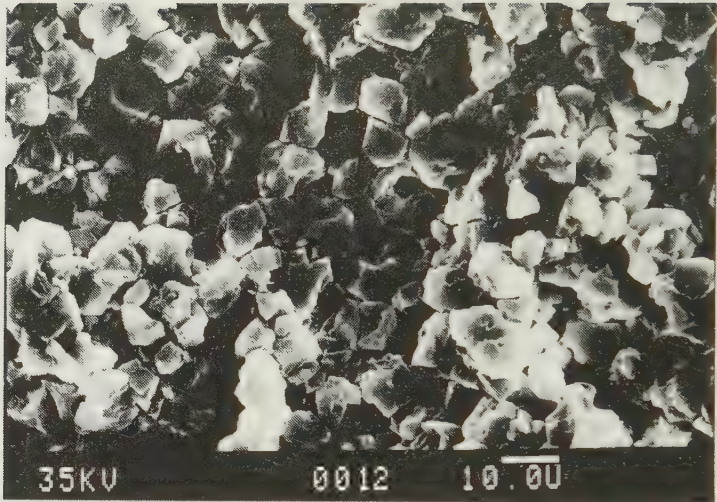


Abb. 46: REM-Aufnahme einer raugewitterten Muschelkalk-Oberfläche
(Ausschnitt aus Abb. 45)

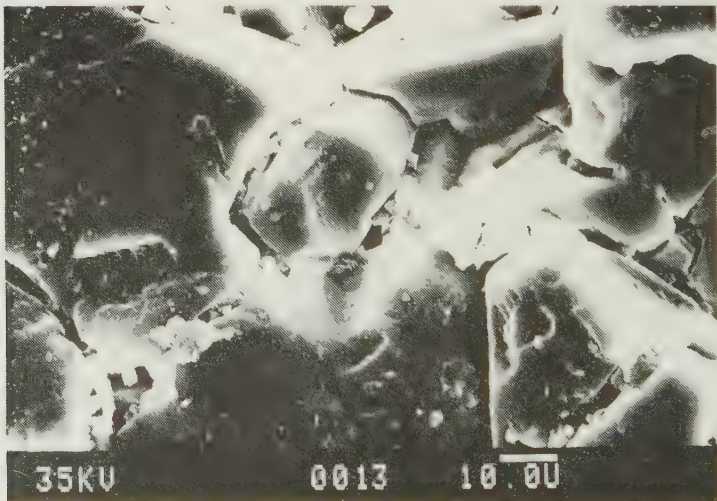


Abb. 47: REM-Aufnahme einer raugewitterten Muschelkalk-Oberfläche
(vergrößerter Ausschnitt aus Abb. 45)

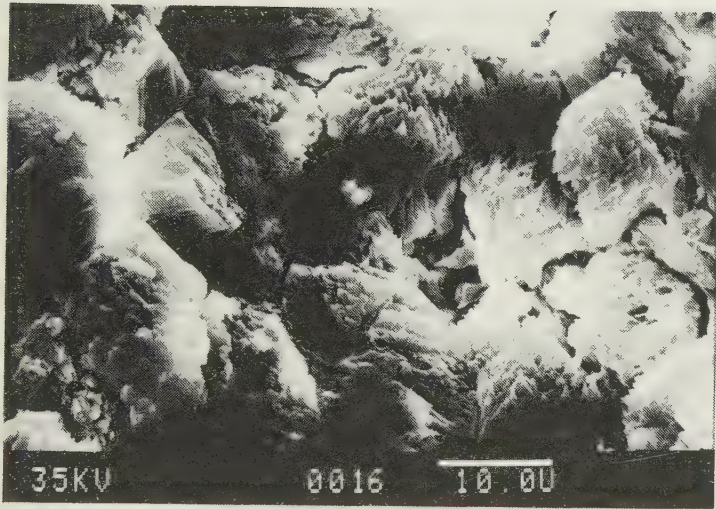


Abb. 48: REM-Aufnahme von angelösten Calcitkörnern einer raugewitterten Muschelkalk-Oberfläche (Pacellistraße 1)

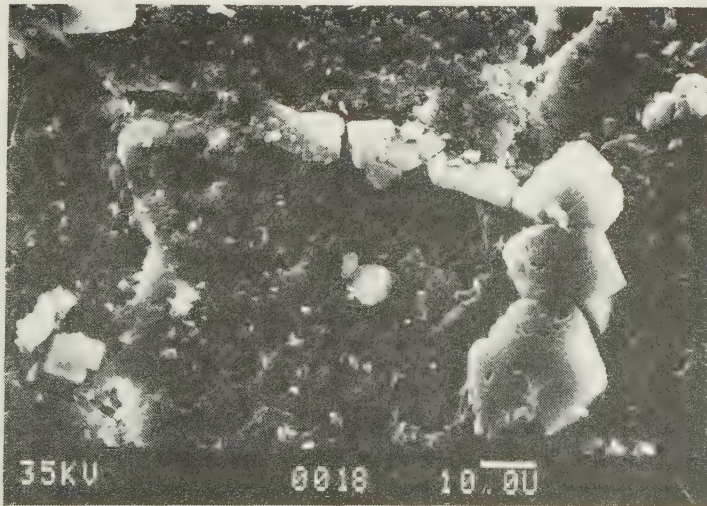


Abb. 49: REM-Aufnahme von leicht angelösten Calcitkörnern, zwischen denen neugebildete Gipskristalle sprossen (Pacellistraße 1)

mit dem Gesteinscarbonat entstehen, andererseits stellt das carbonatische Material offenbar ein günstiges Substrat dar für die Anlagerung von allochthonen Gipsbildungen aus schwefelsaurem Wasser und carbonathaltigem Luftstaub.

Auf neuen Muschelkalkoberflächen entsteht auf den nicht wasserbespülten Flächen bereits nach wenigen Jahren ein dunkler Belag aus rußschwarzem Gips. Dieser Belag überzieht gleichmäßig ganze Gebäudefassaden, er ist zunächst sehr dünn ausgebildet und kann im Laufe der Zeit zu einer dicken Kruste anwachsen. Daß es sich bei dem 'dunklen Belag' in den Anfangsstadien seiner Entwicklung bereits um eine Veränderung der Gesteinsoberfläche handelt, wird oft erst durch den Helligkeitskontrast zu den abgespülten und rauh abwitternden Flächen erkennbar.

Im Wechselspiel von Abspülung und Verkrustung entstehen optisch oft reizvolle Muster zwischen den hellen, rauh gewitterten Flächen und den tief schwarzen Gipsbelägen. Bei stark gegliederten Fassaden werden die baulichen Strukturen durch die Hell-Dunkel-Kontraste zusätzlich betont. West- und Ostseiten von Gebäuden verhalten sich dann manchmal wie positive und negative Fotografien: Von Westen gesehen sitzen schwarze Ausschnitte inmitten hell abgewitterter Flächen, von Osten her betrachtet zergliedern einzelne hell gespülte Areale die schwarz verkrustete Umgebung. Auf ungegliederten Flächen entstehen fahnenartig nach oben züngelnde Schwärzungen. Scharriert bearbeitete Werksteinoberflächen, Fugenspalten, Risse und sonstige Unstetigkeiten in den Werksteinen lenken das ablaufende Wasser und damit die Krustenstrukturen in bestimmte Richtungen, wodurch sich ebenfalls vielgestaltige Hell-Dunkel-Spielarten ergeben.

Eine vorwiegend auf polierten Muschelkalk-Blaubank-Gesteinen auftretende, aber auch darüber hinaus weit verbreitete Erscheinung ist die netzartige Dunkelung. Die gedunkelte Fläche ist dabei in eine netzartige Struktur aufgelöst, die durch millimeter- bis zentimetergroße helle Flecken hervorgerufen wird. Die hellen Flecken sind offenbar frei von Gipsbildungen; in der Mitte der Flecken ist manchmal eine kleine porige Vertiefung sichtbar. Die Bedeutung und Entstehungsweise der netzartigen Dunkelung sind unklar.

Eine weitere Erscheinung der Gipskrustenbildung auf etwas stärker verschmutzten Flächen stellen die hier so genannten "Tigerflecken" dar, punktwise auftretende, kleine Flächen (mm^2 bis cm^2) bedeckende, manchmal auch linienhaft verlaufende "Ausblühungen" von schwarzen Gipsen. Anders als die sehr dünne und glatte 'Dunkelung' erheben sich die 'Tigerflecken' wie sich entwickelnde Zäpfchensinter etwas über die umgebende Gesteinsoberfläche hinaus und wirken dadurch rauh. Ansatzpunkte für die Flecken sind häufig graue Staubablagerungen oder kleine Poren und Risse bzw. Grenzlinien zwischen Schalenstücken des Muschelkalks und feinkörniger Matrix.

Die gröber körnigen Schillpartien an den Oberflächen von polierten Blaubank- und Goldbankgesteinen neigen auch unter einer Gipsverkrustung zum Ausplatzen.

Häufig zeigt sich das erste Stadium des Ausmuschelns durch ein Aufblähen der eventuell mergeligen Bindemittelmasse, die - manchmal hellgelb verfärbt - über die Gesteinsoberfläche herausquillt und so das Schillteil aus dem Gesteinsverband herausdrückt.

Im Spritzwasserbereich, d.h. in der untersten Sockelzone von Gebäuden, bei denen Tropfwasser von der Dachkante oder von vorstehenden Fassadenteilen herabtropft, können sich keine Gipskrusten ansiedeln. Das Gestein wird abgespült, aber kaum rau gewittert; es nimmt dort eine bleiche, bläulich-gräue Farbe an.

Auf älteren Werksteinen, auf rauen Oberflächen, in größeren Porenhohlräumen und in Situationen intensiver Schmutzansammlung wachsen die Gipskrusten zu dicken, meist grau verschmutzten Belägen an. Durch Aufnahme von Regennässe können solche Krusten periodisch aufweichen und sich in Richtung der Schwerkraft zu wulstig-runzeligen Bildungen zusammenschieben.

Bei manchen älteren Gebäudefassaden, die um die Jahrhundertwende entstanden sind, verdeckt ein dicker, entfernt an Lack erinnernder, dunkel-brauner Belag die Werksteine (z.B.: Promenadeplatz 7, 1907; Weinstr. 4 (1.Stock), 1909; Residenzstr. 10, 1911). Wahrscheinlich gaben frühere Fassadenanstriche den Anlaß für diese Art der Krustenbildung.

Normalerweise verhält sich die oberflächlich angelagerte Gipskruste weitgehend inaktiv bezüglich einer tiefer greifenden Gesteinsverwitterung. In Bereichen periodisch intensiver Durchfeuchtung im Kapillarwassersaum oder in Kondens-, Sicker- oder Tropfwasserbereichen innerhalb verkrusteter Flächen können sich aber Teile der Gipssubstanz lösen, mit der Feuchtigkeit ins Innere des Gesteins eindringen und dort als weiße Ausblühungssalze ernste Schäden hervorrufen. Es kommt zum tiefgreifenden Ausplatzen des Kalksteins mitsamt der Kruste, das mit Absanden, Abmehlen und Ausblühungserscheinungen einhergeht.

Abb. 50 stammt von einem Probenstück der Fassadenverkleidung des Gebäudes Lenbachplatz 7 (Baujahr 1955) und zeigt den Entwicklungsstand einer Gipskrustenbildung auf einer freien, nach Osten weisenden Fläche nach 28 Jahren der Exposition.

Makroskopisch erscheinen die Blaubank-Platten als schwach gipsverkrustet ('dunkel belegt') mit Bereichen von 'Tigerflecken'-Besatz. Die REM-Aufnahme zeigt im linken Bilddrittel einen Gipskristall-Filz; rechts wachsen einzelne größer ausgebildete Rosetten und Knospungen von Gipsen auf der (dunkel erscheinenden) hier feinkörnigen Muschelkalkoberfläche auf.

Abb. 51 gibt einen vergrößerten Ausschnitt einer solchen Gipsknospe wieder. Interessant ist dabei die engere Umgebung des isoliert auf den Calcitkörnern aufsitzenen hellen Gipses rechts oben. Man gewinnt den Eindruck, als befände sich das Gipsaggregat im Zentrum einer Vertiefung, die mit einer Art von 'Lösungshof' den neugebildeten Kristall umgibt. Möglicherweise ist hier eine Situation zu beobachten, in der aufgelöste carbonatische Gesteinssubstanz mit zur Gipsbildung beiträgt. Auch

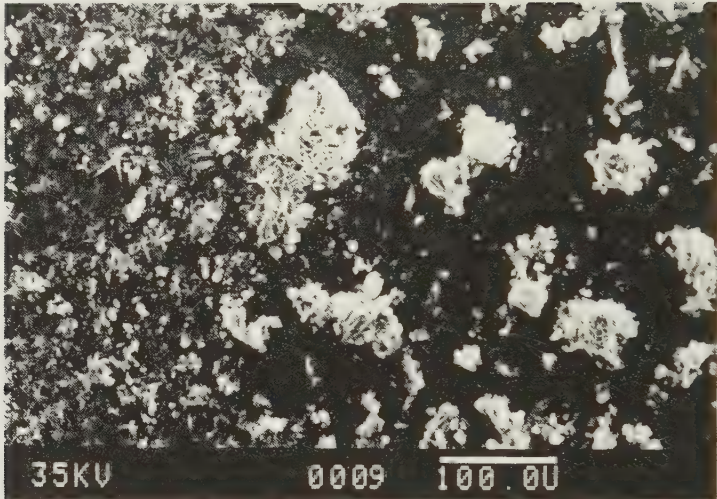


Abb. 50: REM-Aufnahme einer bereichsweise leicht gipsverkrusteten Muschelkalk-Oberfläche (Lenbachplatz 7)

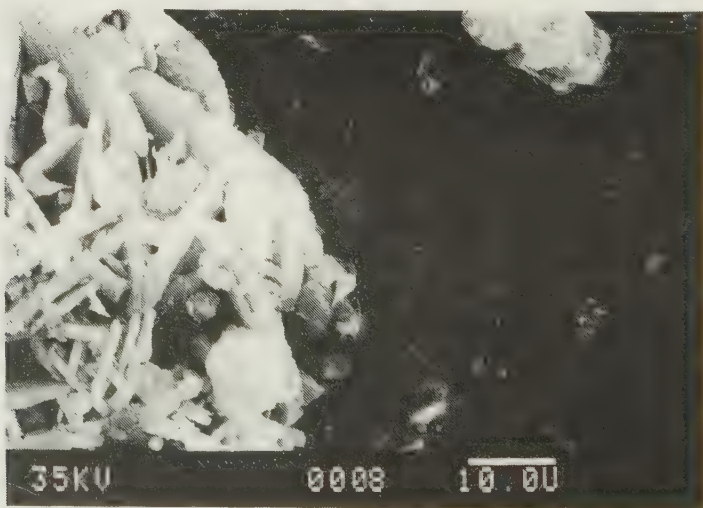


Abb. 51: REM-Aufnahme von neugesprossenen Gipskristallen auf einer Muschelkalk-Oberfläche (vergrößerter Ausschnitt aus Abb. 50)



Abb. 52: REM-Aufnahme einer gipsverkrusteten Muschelkalk-Oberfläche (Pacellistraße 1)

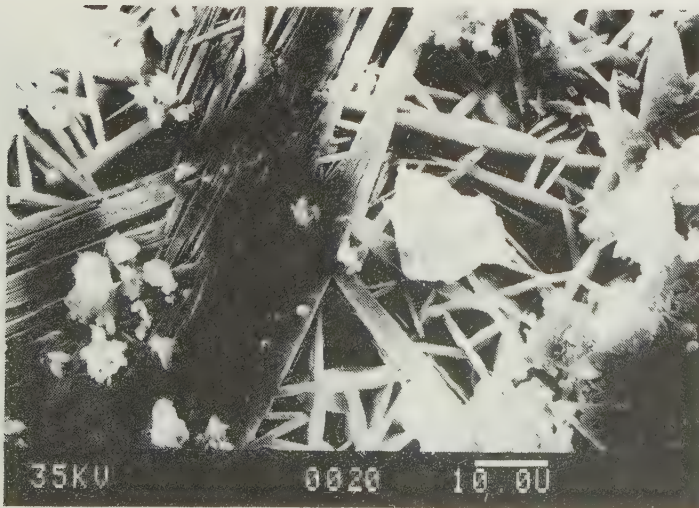


Abb. 53: REM-Aufnahme von Krustengipsen auf einer Muschelkalk-Oberfläche (Pacellistraße 1)

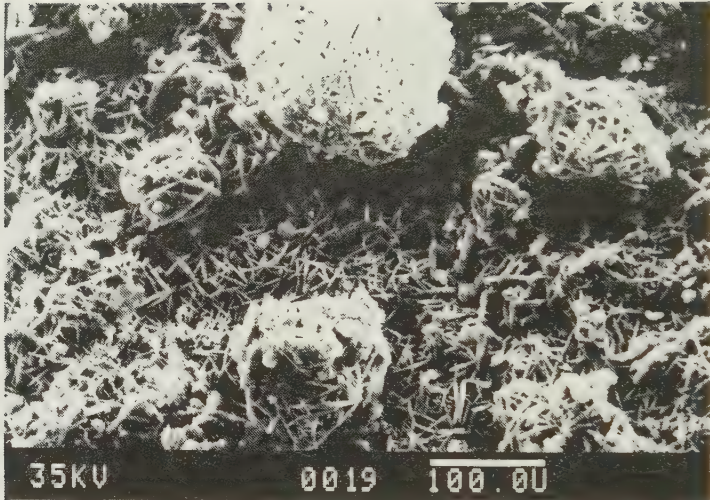


Abb. 54: REM-Aufnahme von Gipskrustenbildungen auf einer Muschelkalk-Oberfläche (Pacellistraße 1)

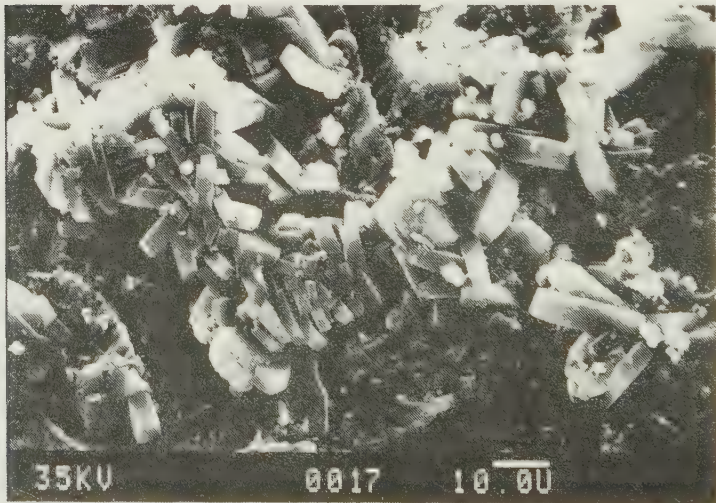


Abb. 55: REM-Aufnahme von Gipskristallen, die zwischen den Calcitkörnern einer Muschelkalk-Oberfläche herausspriessen (Pacellistraße 1)

bei anderen Kristallknospungen in Abb. 48 sind solche "Schatten" um die Gipsrosetten zu erkennen, die in der schwächeren Vergrößerung aber auch als wirkliche Beschattungseffekte erklärt werden könnten.

Voll ausgebildete Gipskrusten, welche das "Muttergestein" völlig überdecken, zeigen die Abbildungen 52, 53 und 54, die alle von einer schwarz verkrusteten Fläche unterhalb einer Fensterbank der Westfassade des Gebäudes Pacellistr. 1 (Baujahr 1955) stammen.

Abb. 52 illustriert das Aussehen eines "normalen" Gipskrustenfildes, in den einzelne Carbonatpartikel als Staubkörner eingewachsen sind.

Abb. 53 zeigt das gegenseitige teilweise Durchdringen von sich in verschiedenen Richtungen ausbreitenden Gipskristallen.

Abb. 54 gibt das knöllchenhafte Wuchern von Gipsen auf einer bereits dicht geschlossenen Kruste wieder, das sich zum makroskopischen "Zäpfchensinter" entwickeln kann.

Abb. 55 schließlich (ebenfalls Pacellistr. 1) zeigt Gipse (nach EDAX-Analyse) in etwas ungewöhnlicher Kristallform, die aus den Fugenspalten zwischen größeren Carbonatkörnern herauswachsen.

6.3.2. Expositionsdauer

Aus der Zahl der 131 in der Spezialkartierung 'Verwitterung des Muschelkalks' aufgeführten Gebäude wurden 45 herausgesucht, die nach dem Verbaualter ihrer Naturwerksteine hinreichend genau datierbar waren. Mit der Auflistung dieser Vorkommen in Tabelle 58 läßt sich das Verwitterungsgeschehen an den Muschelkalkwerksteinen in der Münchner Innenstadt in seinen wesentlichen Zügen veranschaulichen.

Bis zum 2. Weltkrieg wurden ausschließlich Muschelkalk-Kernsteine an den Außenfassaden verbaut. Ein großer Teil dieser Vorkommen wurde in der Zwischenzeit renoviert. In den Wiederaufbauzeiten der 50er Jahre fanden dann auch Blaubank-Varietäten, zu dünnen Platten aufgeschnitten, reichlich Verwendung. Die bald augenscheinlich werdende Anfälligkeit gegenüber den Witterungseinflüssen führte dazu, daß nach einer Pause von etwa 1960 bis 1980, in der Muschelkalk allgemein nur selten verbaut wurde, heute wieder bevorzugt Kernsteine verarbeitet werden, in dicken, blockähnlichen Platten.

Als "abgewittert" zu bezeichnende Werksteine haben in der vorgestellten Auswahl mindestens 25 Jahre Expositionsdauer hinter sich; ebenfalls die Gesteine mit deutlich gipsverkrusteten Flächen. Leichte Gipsanflüge und -beläge werden bereits nach wenigen Jahren als 'Dunkelung' sichtbar. Die weitere Abwitterung bzw. Verkrustung schreitet anscheinend gemächlich voran, denn sehr starke, die ganze Werksteinfläche erfassende Abwitterungen und Krustenbildungen treten ausschließlich bei Gebäuden auf, die bereits vor dem 1. Weltkrieg erbaut worden sind.

Lokalität	Baujahr	Gesteins- varietät	Verwitterungszustand			
			abgewittert	verkrustet	Ausbrüche	Salzschäden
Salvatorplatz 1	1887	Kernstein	xx	xx	xx	xx
Am Platzl 9	1897	Kernstein		x		
Am Platzl 4	1900	Kernstein		F	F	
Tal 38	1900	Kernstein	x	x		
Lenbachplatz 8	1900	Kernstein	xx	x		
Neuhauser Str. 44	1905	Kernstein	x	xx		
Promenadeplatz 7	1907	Kernstein		xx		
Salvatorstr. 11	1908	Kernstein		F		
Sparkasse im Tal	1908	Kernstein	xx	R		
Weinstr. 4	1909	Kernstein		xx		
Promenadeplatz 9	1910	Kernstein	x	xx		
Residenzstr. 10	1911	Kernstein	x	xx		
Diennerstr. 14-15	1912	Kernstein	x	x		
Ettstr. 2	1914	Kernstein	x	xx	F	F
Kaufingerstr. 12	1914	Kernstein	x	x	x	
Amiraplatz 1	1940	Kernstein		x	x	
Theatinerstr. 7	1949	Kernstein		x		
Briennerstr. 1	1952	Blaubank	x	x	xx	x
Pacellistr. 4	1952	Kernstein	F		F	
Theatinerstr. 13	1953	Kernstein		x		
Theatinerstr. 11	1953	Kernstein		x		
Theatinerstr. 9	1953	Kernstein	x	x		
Theatinerstr. 8	1953	Kernstein		x		
Neuhauser Str. 52	1953	Kernstein	x		x	
Kapellenstr. 2-4	1954	Kernstein	x	x		
Maximiliansplatz 13	1955	Blaubank	x	x		
Lenbachplatz 7	1955	Blaubank	x	x	x	
Maxburgstr. 4	1955	Blaubank			xx	xx
Karmeliterkirche	1955	Kernstein	x	x	x	
Maxburgstr. 2	1955	Blaubank		x		
Pacellistr. 1	1955	Blaubank	x	x	x	
Karlsplatz 6	1956	Blaubank		x		x
Karlsplatz 5	1956	Blaubank		x	x	
Theatinerstr. 33-35	1957	Blaubank	x		x	
Residenzstr. 19-20	1957	Blaubank	x	x		
Hauptpost	1957	Kernstein	x	x		
Residenzstr. 23	1958	Blaubank		x)		
Herkulesaal-Residenz	1958	Kernstein	x)	x)		
Theatinerstr. 17	1960	Kernstein		x)		
Residenzstr. 18	1962	Blaubank		x)		
Span. Kulturinstitut	1962	Kernstein		x)		
Residenzstr. 7	1979	Blaubank		x))		
Perusastr. 7	1980	Kernstein		x))		
Theatinerstr. 46	1980	Kernstein				
Prannerstr. 15	1981	Blaubank				

R renovierte Fassade

F Oberfläche überstrichen

x)) sehr schwaches Schadensausmaß

x) schwaches Schadensausmaß

x mittleres Schadensausmaß

xx starkes Schadensausmaß

Tab. 58: Expositionsdauer und Verwitterungszustand von Muschelkalk-Werksteinen mit Verbaudaten zwischen 1887 und 1981

Ausbrüche und Abplatzungen kommen vorwiegend bei den dafür anfälligen Blau-bank-Verkleidungen aus den 50er Jahren vor sowie bei allen mit einem Farbanstrich überzogenen Kernstein-Quadern.

6.3.3. Expositionsrichtung

Sowohl das Auftreten der 'Rauhen Abwitterung' wie auch das der Gipskrustenbildung sind sehr stark expositionsabhängig. Der fast ausschließlich durch westliche Winde herangeführte Schlagregen führt im großen und ganzen zu rauh abgewitterten Westfassaden und zu schwarzen, gipsverkrusteten Ostwänden. Genau betrachtet finden raue Abwitterungen an allen häufig von Niederschlagswasser überflossenen Flächen statt, d.h. auch auf ostexponierten Seiten, wenn Teile des Ablaufwassers durch die Baukonstruktion über ostorientierte Flächen geleitet werden. Ebenso verkrusten auch westorientierte Bauteile, etwa im Lee-schatten von überstehenden Fassadenteilen oder an freier Fläche, wenn durch Unstetigkeiten der Fassadenverkleidung das Ablaufwasser so geführt wird, daß bereichsweise Gelegenheit zu dauerhafter Verkrustung gegeben ist.

Um die Aussagen zur Richtungsabhängigkeit der Verwitterungserscheinungen zu quantifizieren, wurden die Fassadenflächen der 131 untersuchten Gebäude nach ihren Expositionsrichtungen in 15°-Schritten ausgezählt. Es ergeben sich 199 Meßwerte der Fassaden-Expositionsrichtungen. An diesem Bestand von Muschelkalk-Vorkommen wurden dann die Häufigkeiten des Auftretens einzelner Verwitterungserscheinungen gemessen, indem die Zahlen der verwitterten Vorkommen zu den Zahlen des Gesamtbestandes innerhalb der 15°-Sektoren in Beziehung gesetzt wurden (das Verfahren ist in Abschnitt 6.2.4. eingehend beschrieben). Durch gleitende Mittelbildung und Auftrag der Schadenshäufigkeiten in Relation zur mittleren Schadenshäufigkeit über alle Richtungen hinweg entstehen die Kurven der Abbildungen 56, 57, 58, 59 und 60.

Sehr deutlich sind die Verhältnisse bei der 'Rauhen Abwitterung' (Abb. 56) und bei der netzartigen Dunkelung (Abb. 57).

Die 'Rauhe Abwitterung' hat ihre weiteste Verbreitung erwartungsgemäß an den nach Westen orientierten Flächen, die zu fast 60 % abgewittert erscheinen. (Man muß bedenken, daß die zugrunde liegenden Beobachtungen sich vorwiegend auf die Verhältnisse in Augenhöhe, also im Erdgeschoßbereich, beziehen, wo durch Fassadenüberstände bereits ein großer Teil der Spülkraft des Ablaufwassers aufgebraucht ist.)

Am wenigsten häufig abgewittert (nur zu ca. 15 % der Flächen) sind die nach Norden gerichteten Fassaden. Dann steigt die Abwitterungsrate über Ost und Süd

allmählich zur Spitze im Westen an, wobei im nordöstlichen Sektor ein deutliches zweites Maximum auftritt. Eindrucksvoll ist der steile Abfall der Kurve von der West- zur Nordexposition.

Der Gesamtverlauf der Verteilung läßt sich allein aus der Richtungsabhängigkeit des Niederschlages noch nicht befriedigend erklären. Zwar ist auch bei der Niederschlagswindrose (vgl. Abb. 13) ein zweites, geringes Maximum im Nordosten ausgebildet, zwingend werden die Zusammenhänge aber erst, wenn man auch die Stärkewindrose (vgl. Abb. 15) mit in die Betrachtung einbezieht. Aus der Kombination von Stärke- und Niederschlagswindrose setzt sich dann ein Kurverlauf zusammen, wie er von den abgewitterten Fassadenflächen in Abb. 56 wiedergegeben wird.

Einzig abhängig offenbar von den Niederschlagswindrichtungen ist die netzartige Dunkelung, von der insgesamt etwa 20 % der Fassadenflächen betroffen sind. Sie ist an westorientierten Flächen nur zu 5 % vorhanden, an den nach Osten gewandten Seiten aber zu fast 40 %. Der Kurvenverlauf in Abb. 57 zeigt sehr deutlich das Häufigkeitsminimum im Westen und das Maximum in der Gegenrichtung im Osten.

Auf den ersten Blick paradox erscheint das Bild der Gipsverkrustungen (Abb. 58). Hier sind Krustenbeläge gemeint, die über das Maß einer Dunkelung hinausgehen, also eine makroskopisch sichtbare Eigendicke entwickeln und das Muschelkalkgestein wenigstens bereichsweise vollständig bedecken. Überraschenderweise gleicht der Kurventrend demjenigen der rauen Abwitterung in Abb. 56: Vermehrte Krustenbildung an den west- und auch an den ostorientierten Flächen, ein Minimum im Norden.

Nun finden sich häufig Verkrustungen unter vorstehenden Bauteilen auch an Westfassaden und erscheinen dort bei einer Kartierung vielleicht sogar eher einer Aufzeichnung wert zu sein. Insgesamt scheint die vermehrte Abspülung auf den nach Westen und nach Nordosten gerichteten Flächen aber tatsächlich auch zu einer intensiveren Krustenbildung in den Leebereichen des Ablaufwassers zu führen, wenn sich der von den freien Fassadenflächen abgespülte Staub an den Rändern der Leebereiche konzentriert ablagert.

Berücksichtigt man nur diejenigen Fassadenflächen, die ausschließlich gipsverkrustet sind, ohne auch gleichzeitig abgewitterte Bereiche aufzuweisen, ergibt sich die Verteilungskurve in Abb. 59. Zur Verdeutlichung wurden hier auch die gleichmäßig gedunkelten Gebäudefronten mit einbezogen. Es entsteht eine zum Bild der 'Rauen Abwitterung' (Abb. 56) antagonistisch verlaufende Kurve: Hohe Zahlen bis 50 % im Norden, wo Schlagregen selten auftritt und die Windstärken gering sind, wenig gipsbelegte Flächen in der Westwindrichtung. Im Osten und Süden vollzieht sich ein uneinheitliches, stufenweises Abfallen der Häufigkeit.

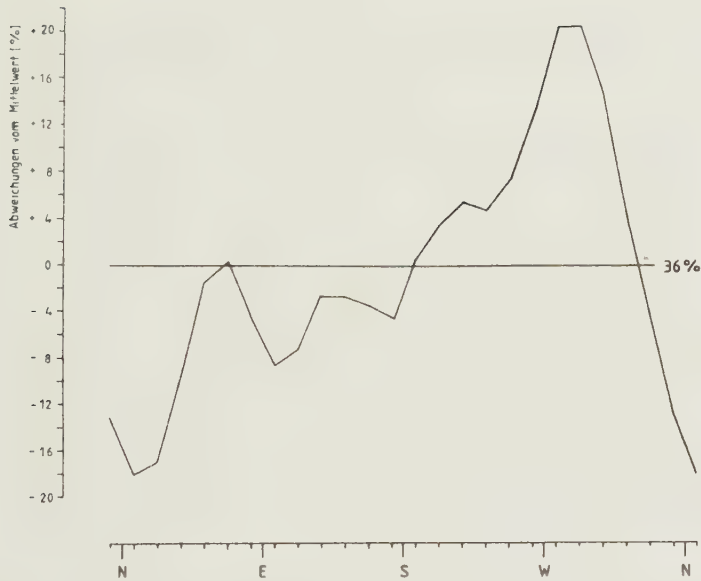


Abb. 56: Relative Schadenshäufigkeiten von "rauhgewitterten" Muschelkalkfassaden in Abhängigkeit von den Expositionsrichtungen

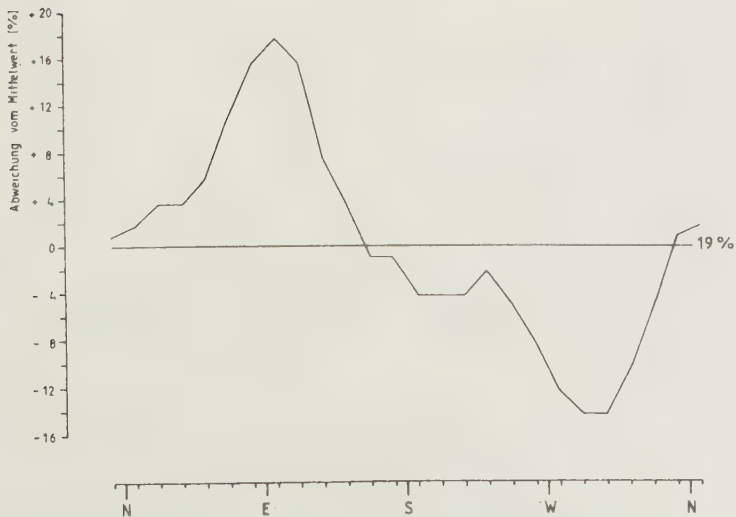


Abb. 57: Relative Schadenshäufigkeiten von "netzartig gedunkelten" Muschelkalkfassaden in Abhängigkeit von den Expositionsrichtungen

ten auf die westexponierten Seiten zu, wobei besonders die Südrichtung als kleines Maximum in Erscheinung tritt. Im Nordwesten erfolgt dann ein steiler Anstieg vom westlichen Minimum zum nördlichen Maximum.

Bei der 'mürben' Abwitterung unter Absanden und Ausblühungen besteht ein ausgesprochenes Häufigkeitsmaximum (bis ca. 45 % der Vorkommen) auf südexponierten Seiten, die übrigen Expositionen besitzen Schadensanteile von etwa 30 %. Zur Erklärung des südlichen Maximums steht eigentlich nur die Insolationsrichtung zur Verfügung, die auch bei den Schäden durch Ausblühungssalze (vgl. Abschnitt 6.2.4.) eine Rolle spielt. Bei den Muschelkalk-Gesteinen (Abb. 60) wird die Insolationswirkung, die zusätzlich zu einer hohen Lufttemperatur die Erwärmung und Austrocknung und damit die Salzkristallisation auf den süd- und besonders südwestexponierten Seiten fördert, im Südwesten durch die Schlagregenwirkung krass unterbrochen. Das in großer Menge anfallende Ablaufwasser spült Salze und evtl. locker ausbrechende Teile ab. Einzig unter Fassadenüberständen entwickeln sich aus den Gipskonzentrationen heraus Salzschäden und Gesteinsausbrüche.

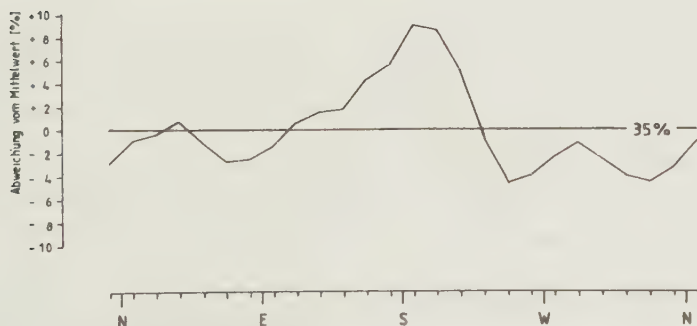


Abb. 60: Relative Schadenshäufigkeiten von Muschelkalk-Fassaden mit "Ausplatzungen", "Ausbrüchen", "Absandungen" und "Ausblühungen" in Abhängigkeit von den Expositionsrichtungen

6.4. Schalenverwitterung nordostbayerischer Granite

Ein auffallendes und interessantes Phänomen stellt die Schalenverwitterung von Naturwerksteinen dar, deren Entstehungsmechanismus bis heute nicht befriedigend erklärt worden ist. In München zeigen besonders die in der Gründerzeit häufig verbauten nordostbayerischen Granite diese Verwitterungsform; entsprechende Schalenbildungen treten aber auch an Sandsteinen und Carbonatgesteinen auf (vgl. KIESLINGER 1959).

(Unter "Schale" wird im folgenden die äußere Werksteinschicht verstanden, die sich vom Restgestein ablöst. Als "Kruste" werden alle auf der Gesteinsoberfläche angelagerten Stoffe bezeichnet. Vgl. auch GRIMM 1984, S. 532.)

KIESLINGER (1932) macht für die Schalenbildung an Carbonaten den 'Feuchtigkeitsrhythmus' verantwortlich, der sich aus dem wiederholten Wechsel von Regendurchfeuchtung und nachfolgender Verdunstung ergibt. Im Zustand der Durchfeuchtung wird durch Einwirkung von Schwefelsäure carbonatische Gesteinssubstanz aus einer unter der Gesteinsoberfläche liegenden und parallel zu ihr verlaufenden Zone ('sandig-mehlige Zwischenschicht') herausgelöst. Verdunstet die Feuchtigkeit nach außen, so scheidet sich der Lösungsinhalt als Gips in der Oberflächenzone des Gesteins ab und verdichtet diese zur 'Innenkruste' (im folgenden 'Schale' genannt). Nach Ablauf vieler Feuchtwechsel löst sich die äußere Schicht schließlich vom Restgestein ab.

KIESLINGER hält es für möglich, daß der Feuchtigkeitsrhythmus auch für die Schalenbildung an silikatischen Kristallingesteinen verantwortlich zu machen ist, allerdings unter der Annahme eines wesentlich komplizierteren Prozesses der Substanzlösung.

50 Jahre nach KIESLINGER kommt SNETHLAGE (1984, S. 81ff.) als Fazit seiner Untersuchungen zur Verwitterung von Sandsteinen zur im Grunde gleichen Schlußfolgerung, nach der sich im Wechselspiel zwischen Durchfeuchtung und Verdunstung Salze im Bereich einer oberflächennahen Gesteinsschicht anreichern, die auf chemische und physikalische Weise auslaugend und entfestigend wirken und somit den Anlaß des schaligen Zerfalls liefern.

ZEHNDER (1982) beobachtet an Molassesandsteinen der Schweiz, daß Salzanreicherungen in der Lockerzone zwar zum schaligen Zerfall führen, daß aber keinerlei chemische Lösungserscheinungen damit verbunden sind. Die von außen eingewanderten Salze wirken nach ZEHNDER offenbar allein auf physikalische Weise gefügezerstörend.

Aus den Eindrücken während der Kartierarbeiten im Münchner Stadtgebiet entwickelten sich auch beim Autor Vorstellungen über die Ursachen der Schalenentstehung bei Graniten, die auf eine Vorschädigung oberflächennaher Gesteinsbereiche durch die Gesteinsbearbeitung hinauslaufen. Solche Vorstellungen sind nicht neu; sie tauchen in der Literatur und in Diskussionsbeiträgen immer wieder auf (vgl. GRIMM 1983 - Diskussion; GRIMM 1984a). Hier sollen sie als 'Arbeitshypothese' kurz vorgestellt werden, ohne daß ihre Einzelheiten gezielt überprüft worden sind. Mit speziellen Fragen der Granitverwitterung befaßt sich innerhalb der von Prof. Dr. W.-D. GRIMM geleiteten Arbeitsgruppe auch Dipl.-Geol. W. LINDENTHAL, dem an dieser Stelle für anregende Diskussionen zum Thema herzlich gedankt sei.

Zur Erklärung der Schalenbildung bei Graniten soll von der Vorstellung ausgegangen werden, daß die Bearbeitung der Werksteinoberfläche mit dem vielzähligen Stockhammer oberflächenparallele Mikrorisse erzeugt - unter Umständen verstärkt in einer gewissen Tiefe unterhalb der Gesteinsoberfläche. Während beim Bossieren und beim Spitzen die Schlagenergie weitgehend durch das Abtrennen überstehender Gesteinsteile aufgebracht wird, dient das Stocken der gleichmäßigen Verebnung der Oberfläche. Nur noch vereinzelt werden hierbei kleinere Gesteinsteile entfernt; der Großteil der Schlagenergie muß von den obersten Gesteinspartien aufgenommen werden, wobei Mikrorisse im Mineralgefüge angelegt werden dürften.

Eine spätere Schalenablösung vollzieht sich in der Regel streng parallel zu den Flächen, Kanten und Profilverläufen der Werkstücke; ihre Lage hängt offensichtlich mehr mit der äußeren Form der Werkstücke als mit irgendeiner inneren Gesteinstextur zusammen. Mikroskopische Untersuchungen an Schalenstücken von Graniten und auch von Carbonaten zeigen, daß oberflächenparallele Risse im Mineralkorngefüge und sogar quer durch einzelne Mineralkörner den Schalenbereich in gestaffelten Scharen durchsetzen. Chemische Lösungsspuren sind im allgemeinen nicht zu erkennen.

Bei vielen gestockten Werkstücken bilden sich nun aber selbst nach langer Exposition keinerlei Schalenabsonderungen aus. Zum Ablösen einer Schale vom Restgestein müssen weitere Einflüsse hinzukommen. Hier wäre an thermische Spannungen durch Temperaturwechsel zu denken: eine Verkrustung oder Verklebung der Oberfläche durch Gipskrusten, Rußauflagen oder Ölfarbenanstriche könnten unterstützend wirksam werden. Die Hauptursache für das Ablösen der Schalen dürfte dagegen in der Aktivität von Ausblühungssalzen liegen, die in den angelegten Mikrorissen Raum zur Konzentration und zur Kristallisation finden. Tatsächlich sind die ausgeprägtesten Schalenbildungen an Fassadenbereichen dort anzutreffen, wo auch die Salzverwitterung am stärksten wirkt, also vor allem im Sockelbereich, wo das Salzangebot aus dem Straßentaub und die kapillar umgesetzten Feuchtigkeitsmengen am höchsten sind, sowie an höher gelegenen Teilen der Fassaden in der Umgebung von Stauwasserlagen.

Der Gedanke einer Vorschädigung durch die Gesteinsbearbeitung könnte Erklärungen liefern für die oberflächenparallelen Rißerscheinungen, für das Nachzeichnen der Werksteingeometrie durch die ebenfalls oberflächenparallel sich vollziehenden Schalenablösungen und möglicherweise auch für das bevorzugte Auftreten der Schalenbildungen an bestimmten Gesteinen, wie den nordostbayerischen Graniten, falls diese sich als entsprechend anfällig gegenüber mechanischer Beanspruchung erweisen sollten. Schalen dürften demnach nicht auftreten an gesägten Granitplatten, wie sie seit einigen Jahren verstärkt verbaut werden. Deren Expositionszeit ist heute für eine vergleichende Untersuchung noch zu gering. Es muß allerdings auch erwähnt werden, daß gelegentlich an bossierten Granitquadern Schalenablösungen zu beobachten sind.

In der Innenstadt Münchens sind an einer Vielzahl von Gebäuden Granite verbaut. Es lag nahe, den Verwitterungszustand dieser Vorkommen einer speziellen Kartieraufnahme zu unterziehen, um gegebenenfalls Abhängigkeiten zwischen den auftretenden Schäden und den äußeren Verwitterungseinflüssen erkennen zu können. Ein Auszug aus dem den folgenden Untersuchungen zugrunde liegenden Kartiertext ist in Tab. 59 wiedergegeben. Aus Gründen der Vergleichbarkeit beschränkt sich die Auswertung der Befunde auf die Verwitterungserscheinungen nordostbayerischer Granite im Sockelbereich von Gebäuden.

6.4.1. Werksteinvorkommen nordostbayerischer Granite in München

In der Innenstadt Münchens konnten im Zuge der Kartierung im Jahr 1983 etwa 110 Gebäude aufgenommen werden, an denen Fassadenbauteile aus nordostbayerischen Graniten vorkamen. Nicht berücksichtigt wurden die vielen Vorkommen als Stufensteine, Prellsteine, Gartenpfosten u.ä. In der überwiegenden Mehrzahl handelt es sich bei den Werksteinen um Granite aus dem Bayerischen Wald. Nur vereinzelt finden sich Kösseine- oder Waldsteingranite (z.B. am Alten Justizpalast) aus dem Fichtelgebirge oder Flossenbürger Granit aus dem Oberpfälzer Wald (an der Neuen Pinakothek) verbaut.

Tab. 59: Auszug aus der Spezialkartierung: Schalenverwitterung nordost-bayerischer Granite

Westliches Viertel
=====

WE 2 Lenbachplatz 3 (Bernheimer Haus - 1889)

Südseite: Sockel: Granit (Korngröße 1 - 3 mm; Oberfläche gestockt)

Allgemein schwarz verkrustet.

Unterschiedlich intensives Abblättern der verkrusteten Oberfläche;

vor allem von oben sowie von den Ecken und Kanten ausgehend. Abgrusen der locker gewitterten Blättchen unter Ausblühungen.

Aufwölbungen größerer Schalenbereiche; Aufplatzungen, Abgrusen, Ausblühungen.

Gestein unter der Kruste grau-gedunkelt; z.T. mürbe (bes. an den Kanten) und leicht abgrusend. Kanten häufig stumpf gewittert.

In der Nähe des Eingangs Abgrusen und Ausblühungen auf fast 100 % der Fläche; mürber Bröckelzerfall; auch Aufbeulen und Aufplatzen der bereits einmal abgeschalteten Oberfläche.

Oberkante des Sockels dick verschmutzt mit abplatzender Schmutz(?) - und/oder Farbkruste. Manche Stellen von oben her verrostet.

Ostseite: Sockel: Granit (Korngröße 1 - 3 mm; Oberfläche gestockt)

Allgemein schwarz verkrustet; an Kanten und Fugen Kruste abblättern.

Am ehemaligen Kinoeingang mächtige Sockelstücke z.T. mit Farbe überstrichen.

Von unten her relativ intakte, gestockte Oberfläche; nach oben hin zunehmende schwarze Verkrustung; einige (ältere und neue) glatte Abschalungen; Sockel unter Vitrinen teils dunkel durchnäßt.

Auf halber Höhe des Sockels bereichsweise Abschuppungen; hell abgegruste Flächen.

Nordseite: Sockel: Granit (Korngröße 1 - 3 mm; Oberfläche gestockt)

Teilweise überstrichen. Im oberen Drittel des Sockels Aufbeulungen und Schalenabplatzungen; am Gittertor starkes Abgrusen mit Ausblühungen.

1 Sockelstück schwarz überkrustet gewesen; von oben her Abschuppungen. Unterer Teil intakt, aber dick verstaubt.

Zwischenmauer im Hof: Granit (bis 1 cm große Feldspäte)

Allgemein tiefschwarz mit rostfarbenen Einlagerungen verkrustet.

2 etwas vorstehende Pfeilerstücke hell und rau abgewittert.

WE 2 Lenbachplatz 5 (1904)

Ostseite: 4 große Sockelquader: Granit (grob bossiert)

Allgemein schwarz verkrustet mit Schmutzauflage. Vereinzelt Abplatzungen.

Fenstergewändestücke: Granit (Korngröße 2 - 5 mm; glimmerreich; gestockt)

Bei Renovierung frisch gestockte Oberflächen; leicht angegraut; von unten her beginnende Dunkelung.

Sockel unter Schaufenster: Granit (feinkörnig; überstrichen)

Leichtes Abgrusen an den Fugen.

WE 2 Lenbachplatz 6 (1905)

Ostseite: 5 große Sockelquader: Granit (Korngröße 1 - 4 mm; grob bossiert)

Schwarz überkrustet. An 2 Blöcken am Gebäudeende großflächige Abschuppungen, Abgrusen, Abmehlen.

Die Gesteine kommen meist als massive Sockelquader vor. Daneben existieren etwa ein Dutzend Erdgeschoßverkleidungen sowie eine Anzahl weiterer Fassadenbauteile (Portalteile, Fenster- und Türgewändestücke, Balkonplatten u.a.m.) aus Granit. Die Werksteine kamen in der Hauptsache zwischen etwa 1840 und 1910, und zwar neben einigen bossierten oder gespitzten Vorkommen, meist mit gestockter Oberfläche zum Verbau.

Für die folgenden Auswertungen wurden die nicht schalenbildenden Kösseinegranite sowie einige unbedeutende Vorkommen von Sockelleisten ausgenommen, so daß der untersuchte Bestand 101 Gebäude umfaßt und fast ausschließlich Granite aus dem Bayerischen Wald mit Mineralkorngrößen zwischen 1 und 5 mm beinhaltet.

6.4.2. Verwitterungserscheinungen

Die Vielfalt der im Kartiertext aufgenommenen Beobachtungen wurde geordnet und zusammengefaßt, wobei sich die folgende Palette an häufig auftretenden Verwitterungserscheinungen herauschälte:

Besonderer Zustand der Gesteinsoberflächen

- neu; relativ neu
- mit Farbanstrich
- renoviert

Verwitterungserscheinungen

- Feuchtigkeit; Bemoosung; Ausblühungen
- Rostverfärbung
- angeschmutzt; angegraut
- stark verschmutzt; Staubauflage
- gedunkelt; geschwärzt
- schwarze Lackkruste
- schwarze Gipskruste
- rau abgewittert (nicht durch Schalenablösung)
- Aufbeulen einer sich ablösenden Schale
- Aufplatzen der Schale; hohle Schalenränder
- Abblättern; Abschuppen; Abbröckeln
- Abgrusen; Abmehlen
- durch Schalenablösung abgewitterte Oberfläche
- alt abgewitterte, gefestigte Oberfläche
- Verschmutzung oder Verkrustung einer alt abgewitterten oder einer renovierten Oberfläche

Die Ordnung der Erscheinungen gibt in etwa einen chronologischen Verlauf des Verwitterungsfortschrittes wieder, der mit der Vergrauung, Verschmutzung und/oder Verkrustung der Oberfläche beginnt. Gleichzeitig vollzieht sich - äußerlich zunächst nicht erkennbar - die beginnende Ablösung der Schale vom Restgestein. Erste Aufbeulungen und Abplatzungen gehen später in weitflächiges Aufplatzen, in Abblättern, Abschuppen, Abbröckeln, Abgrusen und Abmehlen der oberflächlichen Schicht über, bis schließlich nach Ablösen der locker gewitterten

Teile sich die Gesteinsoberfläche, nun in abgewittertem Zustand, festigt. Liegt die Schalenablösung längere Zeit zurück, können sich erneut Verschmutzungen und Verkrustungen ansiedeln.

Auf Grundlage der Beobachtungen in der Münchner Innenstadt schien es so, als müsse dem Schalenablösungsprozeß notwendigerweise eine Verklebung oder Verkrustung der Gesteinsoberfläche durch Verschmutzung, Gipsverkrustung, Rußanhaftung oder einen Farbanstrich vorausgehen. Schalenbildungen an Graniten von Friedhofsgesteinen in ländlichen Gegenden zeigen jedoch, daß die dem städtischen Milieu entstammenden oberflächlichen Anlagerungen unabhängig von der späteren Schalenablösung zu sehen sind. Allenfalls könnte an eine Verstärkung des Verwitterungsprozesses durch eine Verkrustung zu denken sein.

Als wichtigste Erscheinungsformen der Granitverwitterung sind zu nennen:

Zustand der Gesteinsoberflächen

Einige wenige Bauteile jüngeren Verbaudatums wurden als "neu" angesprochen. Bei annähernd 40 Gebäuden war vor nicht allzu langer Zeit eine Renovierung durchgeführt worden, deren Spuren noch deutlich zu erkennen waren.

Bei Renovierungen werden die verkrusteten und abwitternden Gesteinsoberflächen meist maschinell überstockt, wobei Auflagerungen und lockeres Gesteinsmaterial entfernt werden, die Spuren alter Abwitterungsformen (tief ausgewitterte Kapillarwassersäume, Schalenränder, rundgewitterte Kanten, Krustenreste, Verfärbungen etc.) jedoch oft sichtbar bleiben. Manchmal auch geht nach der Renovierung der lockere Gesteinszerfall in Teilbereichen der Werksteinflächen weiter. Mitunter wurde so vorsichtig überstockt, daß die Renovierung nach kurzer Zeit kaum mehr als solche zu erkennen ist.

Andere Renovierungen erfolgen durch Sandstrahlen, was eine Abstumpfung der Oberflächenformen und besonders der Ecken und Kanten zur Folge hat. Vereinzelt war die Gesteinsoberfläche derart grob abgeschlagen worden, daß der Eindruck einer verunglückten Bossierung entstanden ist.

An manchen Sockelgesteinen wurden Ausbesserungen durch Gesteinsersatz oder durch Steinersatzmassen, auch durch Zement, vorgenommen. Einige Gebäude weisen Kriegsschäden auf, meist als kraterförmige und von Rissen durchsetzte Einschlagstellen von Geschossen.

Rauhe Abwitterung ohne Schalenablösung

Eine raue Abwitterung durch Korn-für-Korn-Verluste der Oberfläche bei sonst intaktem Gestein ist an den Fassadenbauteilen nur in wenigen Fällen andeutungsweise zu beobachten, etwa wenn in der Umgebung von Regenfallrohren regelmäßig große Wassermengen die betroffenen Bauteile überspülen. Normalerweise zeigen sich die Granite gegenüber Schlagregen und Ablaufwasser als beständig.

Verschmutzung; Verkrustung; Rostverfärbung

Auf den Gesteinsoberflächen, besonders auf den rauen, gestockten Oberflächen, sammelt sich mehr oder weniger lockerer Straßenstaub an, der die in neuem Zustand hell und frisch aussehenden Gesteine grau, abgestumpft und gedunkelt erscheinen läßt. In Vertiefungen und auf Gesteinsrauhigkeiten sowie besonders auf den Oberseiten von Bauteilen, von Sockelprofilen und in zurückspringenden

Fugenspalten kann sich der Staub zu einem schwach verfestigten, millimeterdicken, grauen Belag ansammeln.

Schwarze Gipskrusten überziehen durchaus auch Granitoberflächen. Sie unterscheiden sich in ihrem Aufbau nicht von den Krusten auf Carbonatgesteinen.

Abb. 61 zeigt die REM-Aufnahme einer Gipskruste vom Sockelgestein des Hauptgebäudes der Technischen Universität (nach Westen exponierter Gebäudetrakt in der Luisenstraße; Verbaudatum: 1910; Expositionsdauer zur Zeit der Probenahme: 73 Jahre).

Man erkennt die für Gipskrusten typischen rosettenartig zusammengewachsenen und gegenseitig verschränkten, tafeligen Kristallbildungen. Die während der elektronenmikroskopischen Untersuchungen laufend durchgeführten EDAX-Elementanalysen zeigen für Abb. 61 fast ausschließlich Schwefel und Calcium an. Sehr kleine Peaks innerhalb der Elementverteilungskurve für Silicium, Aluminium und Natrium können von vereinzelt in der Kruste eingelagerten Silikat Kornpartikeln herühren.

Abb. 62 zeigt von derselben Lokalität einen Profilquerschnitt durch die völlig vom Gestein gelöste Gipskruste. Die ehemalige Auflagerungsfläche auf dem Gestein zieht diagonal durch die linke Bildseite. Nach rechts hin erfolgte das Dickenwachstum der Kruste. Aus einem knapp 0,1 mm dicken Basisbelag aus feinkörnigen und dicht gelagerten Gipskristallen erwachsen die in Abb. 61 gezeigten, großen und tafeligen Kristallbildungen, die sich in den obersten Zonen der Kruste zu locker gefügten Rosetten und Blumenkohl-artigen Formen hin auflösen.

Rauhigkeiten und eine vor Regenwasserabspülung geschützte Lage begünstigen das Aufwachsen von Gipskrusten. Es ist festzustellen, daß flächenhaft auf Granitsockelstücken haftende Gipskrusten fast nur an solchen Gebäuden vorkommen, deren höher gelegene Fassadenteile aus Carbonatgesteinen bestehen bzw. carbonathaltige Baustoffe (Putze etc.) enthalten. Häufig ist der Zusammenhang zwischen den calciumliefernden Materialien und den Orten der Gipskrustenbildung deutlich erkennbar, etwa wenn besonders ausgeprägte Verkrustungen vom höher liegenden Putz oder Carbonatgestein auf die obersten Teile eines Granitsockelstückes überwachsen, oder wenn sich Krusten, die sich wesentlich aus dem Straßenstaub ernähren, am Fuß des Sockelgesteins heraufziehen.

Häufig sammelt sich auf den vornehmlich in regengeschützter Lage befindlichen Gipskrustenbereichen grauer Straßenschmutz an, der nun die Rauhigkeiten der Kruste zur Anhaftung benutzt. Die Beziehungen zwischen der Staubauflagerung und dem Gipswachstum können im Rasterelektronenmikroskop in der Regel nicht sichtbar gemacht werden, da die locker angelagerten Staubeilchen im Vakuum und unter der Bestrahlungshitze von der Probenoberfläche abspringen. Es sind Zufälle, wenn hier und da doch interessante Einlagerungen innerhalb der Gipskrusten betrachtet werden können:

Abb. 63 stammt wiederum von einem Probestück der Technischen Universität an der Luisenstraße. Umwachsen vom Krustenfz der Gipse erhebt sich

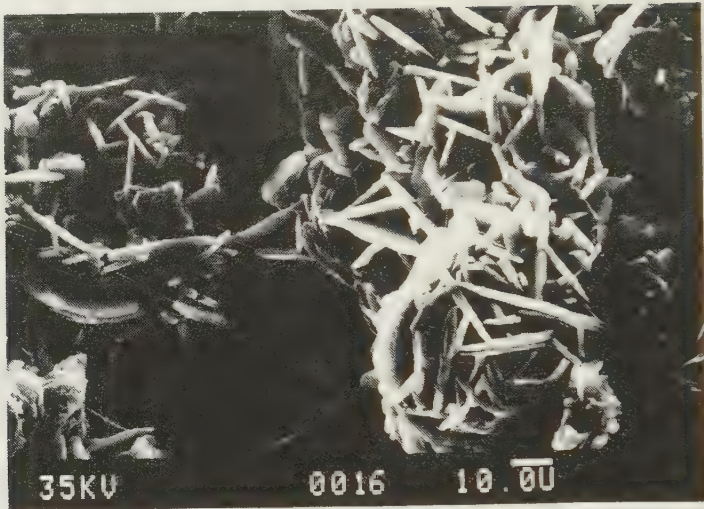


Abb. 61: REM-Aufnahme von Krustengipsen auf Granit (TUM - Luisenstraße)

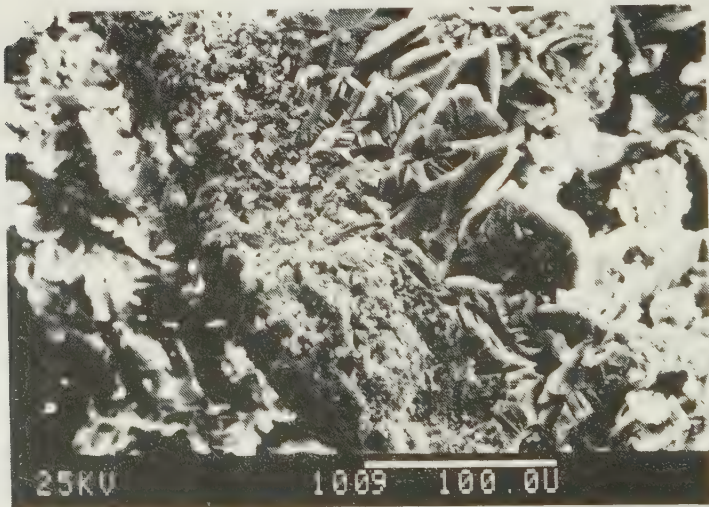


Abb. 62: REM-Aufnahme eines Profilschnittes durch eine auf Granit aufgewachsene Gipskruste (TUM - Luisenstraße)

rechts unten ein Agglomerat von vermutlich Zinkspatkristallen (nach EDAX-Analyse Zink und Schwefel enthaltend). Die Herkunft des Zinks läßt sich unschwer durch eine in den 50er Jahren über diesem Gebäude teil errichtete Dachdeckung aus Zinkblech herleiten (nach frdl. Mitt. von Herrn Dr. FROH), von der aus die Metallionen über das Niederschlags-, Ablauf- oder Abtropfwasser zur Sockeloberkante hin gelangt sein müssen.

Die Abbildungen 64, 65 und 66 sind Aufnahmen eines verkrusteten Probenstückes vom Sockel der Nordfassade des Alten Justizpalastes (erbaut 1897; Expositionsdauer zur Zeit der Probenahme: 86 Jahre).

Abb. 64 zeigt in noch mäßiger Vergrößerung Gipsbildungen der schwarzen Kruste mit eingewachsenen rundlichen Staubkörnern. Bei genauerem Hinsehen erkennt man bereits eine Anzahl kubisch ausgebildeter Kristallite.

Abb. 65 und Abb. 66 geben jeweils Ausschnittvergrößerungen aus Abb. 64 wieder, auf denen sich - insbesondere durch EDAX-Analysen - die quaderförmigen Kristalle als Natriumchlorid-Würfel zu erkennen geben. Das Salz stammt zweifellos aus angespritztem Schneesmelzwasser; nur wenige Meter von der Fassade entfernt verläuft die vielbefahrene Eisenstraße.

Eine besondere Form der Außenverkrustung, die bisher nur bei Graniten beobachtet werden konnte, ist die hier so genannte "schwarze Lackkruste": Die Oberflächen vieler Granitgesteine erscheinen, obwohl sie keine Gipskrusten aufweisen, gleichwohl von einem tief schwarz gefärbten Belag überzogen. Es handelt sich um eine sehr dünne Auflagerung von Rußschüppchen, die sich durch Akkumulation zu einer deckenden und dann schwarz glänzenden Schicht ('Lackkruste') verdichten können.

Der Anteil der von schwarzen Lackkrusten überzogenen Werksteinflächen dürfte um einiges höher sein als derjenige der gipsverkrusteten Granite. Es drängt sich der Eindruck auf, als fehle auf den Granitoberflächen ein vom Substrat erwirkter Anlaß zur direkten Gipskrustenbildung aus der Luft, wie es bei den Carbonatgesteinen der Fall ist. Gleichwohl haften die Rußteilchen an den Graniten an und bilden eine schwarze Lackkruste, während sie zusammen mit einer Gipsausscheidung zur schwarzen Gipskruste würden.

Abb. 67 zeigt die Oberfläche eines Granitschalenbruchstückes von einem nach Süden exponierten Sockelabschnitt des Armeemuseums am Hofgarten (Baujahr: 1905; Expositionsdauer: 78 Jahre).

Die einzelnen Silikatmineralien des Granites sind unter einem dünnen Überzug verborgen, auf dem Staubpartikel oder Salzbildungen haften. Der Überzug weist Spalten und Risse auf, aus denen bevorzugt Kristalle herausprossen.

Abb. 68 ist eine Ausschnittvergrößerung des oberen Bildes, Abb. 67. Es zeigt die kaum in Einzelpartikel aufzulösende körnelige Feinstruktur des mutmaßlichen Rußbelages. Eine EDAX-Analyse gibt einzig Silicium als meßbares Element an. Wahrscheinlich haftet der Belag an dieser Stelle auf einem Quarzkorn.

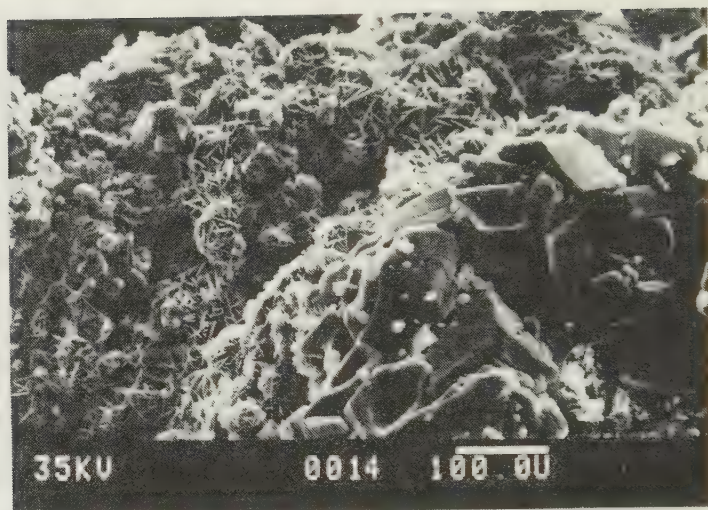


Abb. 63: REM-Aufnahme eines gipsverkrusteten Granitprobenstückes mit eingewachsenem Zinkspat-Kristall (TUM - Luisenstraße)



Abb. 64: REM-Aufnahme einer Gipskruste auf Granit mit eingestreuten NaCl-Kristallen (Alter Justizpalast)

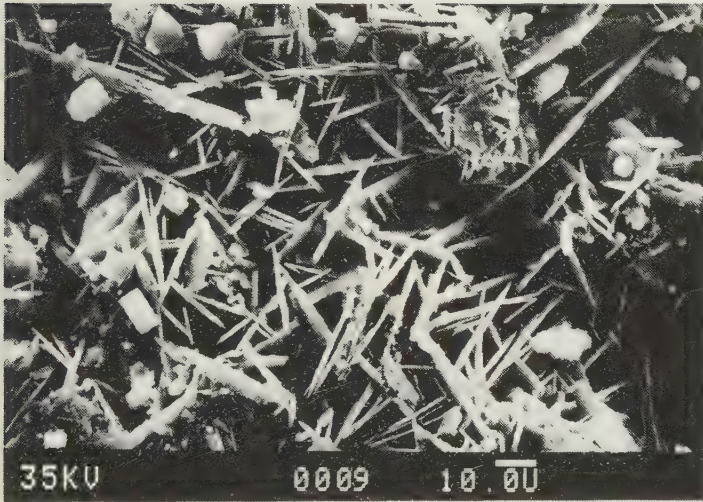


Abb. 65: REM-Aufnahme einer Gipskruste auf Granit mit eingestreuten NaCl-Kristallen (Ausschnittvergrößerung aus Abb. 64)

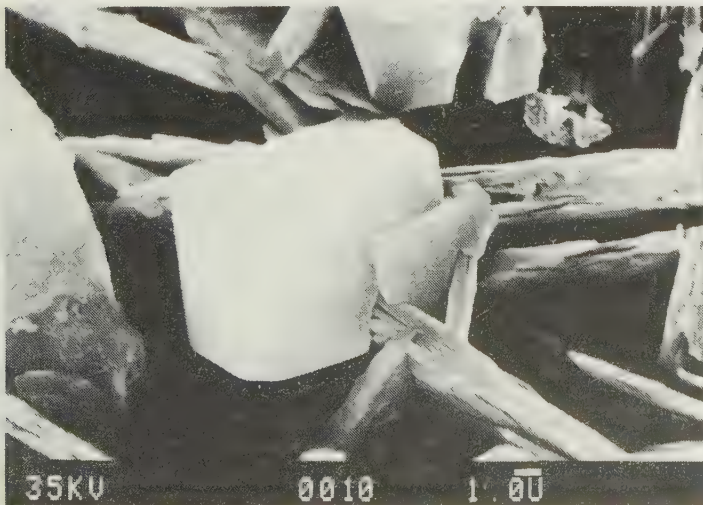


Abb. 66: REM-Aufnahme von Gipskristallen eines verkrusteten Granitprobenstückes mit eingewachsenem NaCl-Kristall (Ausschnittvergrößerung aus Abb. 65)

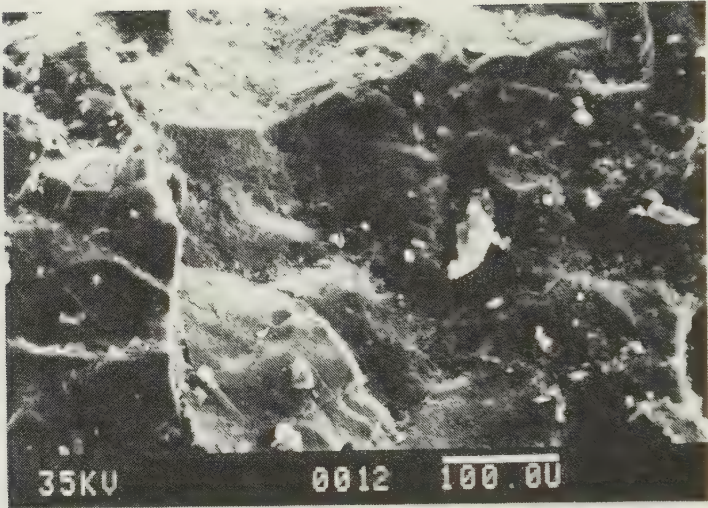


Abb. 67: REM-Aufnahme einer schwarzen 'Lackkruste' auf Granit (Armeemuseum)

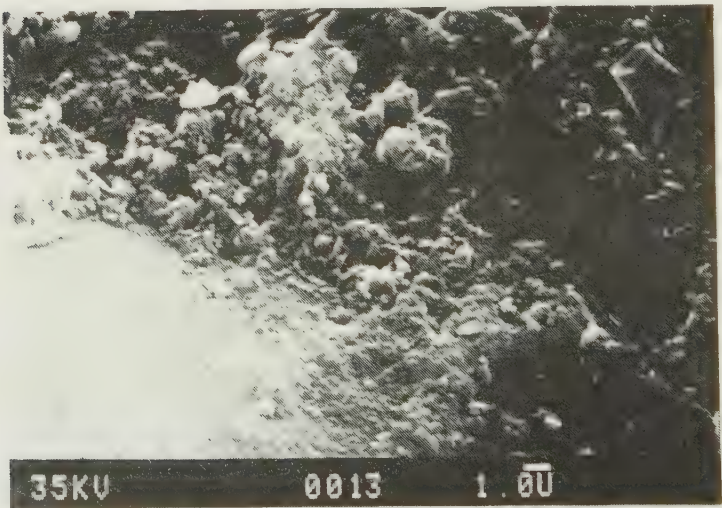


Abb. 68: REM-Aufnahme einer schwarzen 'Lackkruste' auf Granit in starker Vergrößerung (Ausschnitt aus Abb. 67)

Das Fehlen weiterer Peaks im EDAX-Elementspektrum deutet darauf hin, daß keine schwereren Elemente als Natrium am Aufbau der Lackkruste beteiligt sind. So kommt Kohlenstoff als Hauptschubstanz der Kruste durchaus in Frage. Die tief schwarze Farbe der Substanz, das Auftreten in Form von winzigen Schüppchen, das große Haftungsvermögen des Rußes an Oberflächen und schließlich seine Anwesenheit in der städtischen Luft durch Verbrennen von Kohle, Heizöl und Dieseltreibstoff stützen diese Interpretation.

Ein weiteres Beispiel schwarzer Lackverkrustung illustrieren Abb. 69 und Abb. 70, diesmal wiederum an einer Probe des TU-Hauptgebäudes in der Luisenstraße von 1910:

Abb. 69 vermittelt einen Eindruck von der das Gesteinskorngefüge dicht verklebenden Rußschicht. Die craqueléartigen Risse innerhalb der Kruste entstanden vermutlich durch die Beanspruchungen während der Mikroskop-aufnahmen.

Abb. 70 gibt einen Ausschnitt der Lackkruste aus Abb. 69 in starker Vergrößerung wieder. Hier sind einzelne schuppenförmige Partikel im Größenbereich um 1 µm zu erkennen. Das Elementverteilungsspektrum dieses Bildausschnittes wird neben Gehalten an Silicium, Aluminium und Calcium, die von einem unterlagernden Feldspat stammen könnten, durch einen ausgeprägten Eisen- und einen deutlichen Zink-Peak gebildet. Die Kohlenstoffsubstanz kann im Elementspektrum wegen der zu geringen Atommasse nicht erscheinen. Die Eisen- und Zinkgehalte sind in nicht näher bestimmbarer Form innerhalb der schwarzen Verkrustung eingelagert. Das Zink stammt vermutlich von dem bei der Beschreibung der Abb. 63 erwähnten Zinkblechdach über diesem Gebäudeteil, das Eisen wohl von einer ehemaligen Blechabdeckung des Sockelgesteins.

Rostverfärbungen sind neben Vergrauungen, Schwärzungen und Verkrustungen sehr häufig an Graniten zu beobachten. Dabei treten bei den untersuchten Graniten aus der Gründerzeit die von Eisenbauteilen (Dachdeckungen, Dachrinnen, Halterungen, Gestänge, Gitter, Dübel etc.) herzuleitenden, oft intensiven, aber in ihrer Ausdehnung begrenzten Verrostungen zurück gegenüber gleichmäßig flächigen Imprägnierungen der Gesteinsoberflächen mit Rostlösungen.

Die färbende Eisensubstanz gelangt hierbei ebenfalls allochthon auf den Stein, hauptsächlich über den Luftstaub, in dem sich in großer Zahl Eisen- und Rostteilchen befinden, die offenbar in besonderem Maße durch den Straßenbahnbetrieb (Rostbildungen und Abrieb an Oberleitungen und Schienen) bereitgestellt werden. Häufig kommen Rostverfärbungen und schwarze Lackkrusten gemeinsam am gleichen Werkstück vor.

Autochthone Rostverfärbungen durch bereits im Aufschluß ausgerostete Biotite bleiben auf die nähere Umgebung der eisenhaltigen Minerale beschränkt, wie es bei der gelben Varietät des Flossenbürger Granits (z.B. an der Neuen Pinakothek) zu beobachten ist.

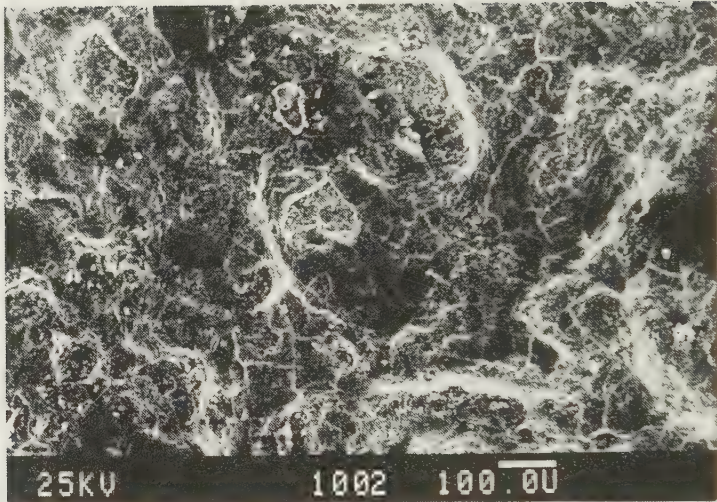


Abb. 69: REM-Aufnahme einer schwarzen 'Lackkruste' auf Granit (TUM - Luisenstraße)

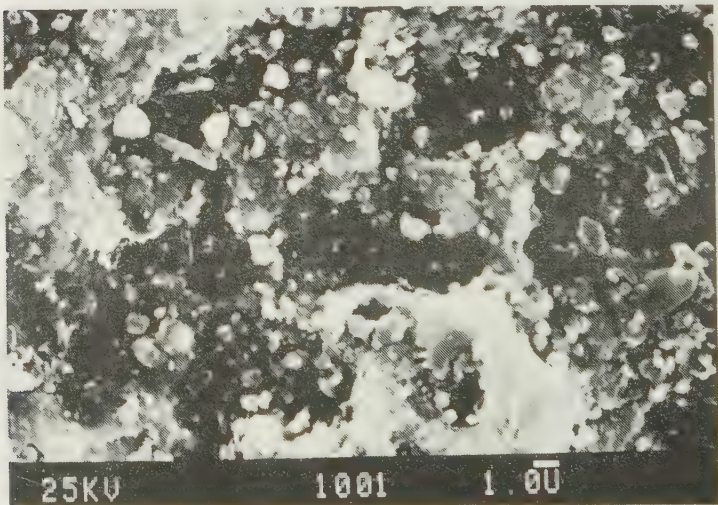


Abb. 70: REM-Aufnahme einer schwarzen 'Lackkruste' auf Granit in starker Vergrößerung (Ausschnitt aus Abb. 69)

Krustenablösung; Schalenablösung

Bei schwarzen Lackkrusten ist im oberen Bereich des Kapillarwassersaumes von Sockelgesteinen manchmal ein schüppchenförmiges Abplatzen der sehr dünnen Rußauflagerung zu beobachten. Lackkrusten auf den Oberkanten von vorstehenden Sockelquadern können außerdem durch herabfallendes Tropfwasser in kreisrunden bis ovalen Flecken abgelöst werden.

Meist jedoch erfolgt die Abtrennung einer Verkrustung vom Gestein bei Lackkrusten und besonders bei den schwarzen Gipskrusten unter Mitnahme von zumindest einer Mineralkornschicht. Damit ist bereits definitionsgemäß eine Schalenablösung vorhanden (Schale = äußere Gesteinsschicht, die sich vom Restgestein löst), wobei in vielen Fällen die Krustenauflagerung durch Verkleben der Oberfläche und Bereitstellen von Salzen die unmittelbare Veranlassung für den Gesteinsschaden darstellen mag. Besonders deutlich wird dieser Zusammenhang bei den Ölfarben-überstrichenen Graniten (s.u.).

Schalenablösungen an den nordostbayerischen Graniten vollziehen sich im untersuchten Stadtgebiet im Rahmen zweier unterschiedlicher Erscheinungsformen:

- Einmal kommt es zur Ausbildung wirklicher Gesteinsschalen, die sich partienweise vom Restgestein lösen, sich eventuell nach außen hin aufwölben, dann aufbrechen und in zusammenhängenden Stücken abfallen.

Häufig beginnt das Aufbrechen im unteren Teil oder in der Mitte der Werksteinflächen in örtlichem Zusammenhang mit der Lage eines ansonsten kaum in Erscheinung tretenden, auf- oder absteigenden Kapillarwassersaumes, um sich nach den Seiten in Form von etwa kreisrunden, münz- bis handtellergroßen Ausbrüchen hin auszuweiten. Die schaligen Abplatzungen können auch an den Sockeloberkanten oder an vorstehenden Sockelprofilteilen ihren Ausgang nehmen.

Die verbleibenden Schalenränder sind oft scharf begrenzt. Die vom Gestein bereits gelösten, aber noch nicht abgefallenen Schalenränder setzen sich mitunter weit in die äußerlich intakt scheinende Gesteinsoberfläche hinein fort, wie man durch Anklopfen am hohl klingenden Ton leicht feststellen kann.

Auf den frei gewordenen Flächen finden nach dem Abschalen im Bereich des Kapillarwassersaumes manchmal Abschuppungen von lockeren Gesteinstteilen statt. Diese Abschuppungen entwickeln aber keine tiefer greifenden Abbrusungszonen - anscheinend werden die Kapillarsaumbereiche nach der Ablösung und dem Abfallen der äußeren Schicht weitgehend inaktiv.

Die neuen Gesteinsflächen festigen sich schließlich, so daß Verschmutzungen und Verkrustungen Fuß fassen können. Am unterschiedlich intensiven Grad der Neuverschmutzung abgeschalteter Flächen läßt sich ersehen, daß der Abschaltungsprozeß sich oft lange Zeiträume hinzieht: Schwarz verkrustete Partien liegen neben leichter verschmutzten und neben ganz hellen, frisch abgewitterten Flächen.

Interessant ist die Ausbildung von zwei oder mehreren, hintereinander liegenden Schalen, die allerdings nur bei sehr wenigen Werkstücken verwirklicht ist.

Häufig enden die Schalenabplatzungen vor den Kanten der Werkstücke, die mit originaler Oberfläche stehen bleiben, so daß das Bild einer Rahmenverwitterung entsteht. In anderen Fällen lösen sich auch ganze Kantenstücke komplett vom Restgestein ab, wobei durch überschneidende Wirkung die Ablösungsfläche dort manchmal tiefer auswittert als auf den Flächen und sich somit wollsackähnliche Formen entwickeln. Brechen die Werkstückkanten ab, ohne daß eine größere Verwitterungstiefe als auf den Flächen erreicht wird, so bleiben wulstartig vorstehende Randbereiche entlang den Fugen und Kanten stehen. Das Verhältnis von wollsackähnlich abgewitterten Stücken zu den Rahmenformen beträgt für den Münchner Bestand etwa 1:10.

Normalerweise sind im Bereich der abgeplatzten Schalenstücke makroskopisch keine Salzanreicherungen festzustellen. Sie mögen ausgewaschen oder primär in nur geringer Konzentration vorhanden gewesen sein. Ein stark aufgebeultes und noch kaum aufgeplatztes Schalenstück am Sockelgestein des Hofbräuhauses, das eigens aufgrund seiner im Inneren stark angereicherten Salze beprobt wurde (Probe S6; vgl. Abschnitt 6.2.5.), enthielt eine für die Salzverwitterung im Sockelbereich typische Kombination von Natriumchlorid und Gips.

- Nach Flächenanteilen weiter verbreitet als die 'echte' Schalenablösung ist eine andere Form des Oberflächenzerfalls der Granite: Die durch Abblättern, Abschuppen, Abbröckeln, Abgrusen, Abmehlen etc. zu beschreibende Abwitterung der Gesteinsoberfläche, der nicht die Bildung von hohlen Schalenstücken vorausgeht. Auf 1 Werkstück mit echter Schalenablösung kommen 2 Gesteine mit schuppigen Ablösungsformen. Eine aufgewachsene Gipskruste wird häufig zusammen mit den fest damit verbundenen, obersten Gesteinskornschichten abgestoßen.

Meist reicht der schuppig-scherbige Zerfall bis in eine Tiefe, die derjenigen der glatten Schalenablösungen entspricht. Die abwitternden Schuppen, Bröckchen oder Blätter sind parallel zur ehemaligen Gesteinsoberfläche angelegt, sie folgen offenbar den im Mikroskop erkennbaren Mikrorissen in den obersten Werksteinbereichen. Während bei den eigentlichen Schalen im Stadium der Ablösung meist keine Salzanreicherungen sichtbar sind, enthalten die kleinteiligen Ablösungsformen häufig auch makroskopisch in Erscheinung tretende Salzausblühungen.

Auch die schuppigen Schalenablösungen ereignen sich in deutlicher Verbindung zu Kapillarswassersäumen. Die Abwitterung kann auf den Mitten der Werkstücke beginnen, aber auch an den Kanten oder beiderseits von Vertikalfugen; sie ist besonders stark ausgeprägt an den untersten Sockelquadern mit Bodenkontakt und wird, sofern der Wassernachschub nur von unten her erfolgt, häufig durch kapillarbrechende Horizontalfugen in ihrer Ausdehnung nach oben hin beschnitten. Im oberen Bereich von Kapillarswassersäumen kann durch intensivere Salzverwitterung eine etwas tiefer ausgewitterte Zone entstehen. Ebenso an den Kanten der Werkstücke durch Überschneidung der von 2 Flächen ausgehenden Verwitterungswirkungen.

In aller Regel reicht die Abwitterung sowohl bei der echten Schalenverwitterung, wie auch bei der schuppigen Ablösung bis in eine Tiefe von etwa 1 bis 2 cm (ausgenommen die tiefer ausgewitterten Kanten und Kapillarsaumbereiche). Hier endet der Gesteinszerfall mit der Ausbildung einer etwas aufgerauten, festen neuen Oberfläche.

Zwischen den Orten des Auftretens bzw. den Intensitäten der Schäden und der Lage der Kapillarwassersäume an den Werkstücken bestehen deutliche Abhängigkeiten.

Die Beschränkung der Schäden auf die oberste Gesteinsschicht und auf Zonen intensiver kapillarer Durchfeuchtung spricht für die anfangs geäußerte Vermutung, daß bei den untersuchten Graniten eine mechanische Vorschädigung durch die Art der Steinbearbeitung vorliegt, die ihrerseits möglicherweise den Kapillarwasserdurchsatz befördert und durch Konzentration von Salzen innerhalb des im Mikrobereich gerissenen Gefüges zur Entstehung der beschriebenen Schädigungen hinführt. Mit Ablösung der äußeren Gesteinsschicht entfallen die für den Wasser- und Salztransport bevorzugten Bahnen der Mikrorisse, so daß sich der Prozeß der Schalenabwitterung nach einem abgeschlossenen Zyklus nicht fortsetzt.

Mit Ausnahme der sehr wenigen Vorkommen aus allerjüngster Zeit (um 1980) weisen alle Gebäude mit nordostbayerischen Graniten an mindestens einem, meist an mehreren oder sogar an allen Werkstücken im Sockelbereich die beschriebenen Schadensformen auf. Die jüngsten dieser verwitterten Sockelgesteine stammen von 1929, die ältesten von 1740, die Hauptmenge wurde zwischen 1840 und 1910 verbaut (vgl. Tab. 60). Von den geschädigten Werkstücken dieser Sockelbereiche sind heute etwa 25 % als "abgewittert" zu bezeichnen; sie besitzen eine abgeschalte, gefestigte Oberfläche. Weitere 25 % der Vorkommen sind renoviert; dabei wurden evtl. noch lockere Gesteinsteile künstlich entfernt, so daß in den meisten Fällen auch hier die schalige Verwitterung zum Abschluß gebracht ist. 50 % der geschädigten Vorkommen befinden sich noch im Stadium der Ablösung, was bedeutet, daß diese Form der Granitverwitterung recht langsam vor sich gehen kann. STOIS (in REIS 1935) beschreibt eine Schalenbildung an der Südseite des TU-Hauptgebäudes in der Gabelsbergerstraße (Baujahr 1868), deren heutiges Schadensbild - eine echte Schalenablösung - bereits damals voll ausgebildet war.

Farbanstriche

Es besteht eine merkwürdige Tendenz, Granitsockelstücke mit Ölfarbanstrichen zu versehen; ja sogar zu versuchen, aufgetretene Gesteinsschäden durch einen neuerlichen Anstrich zu beheben. Ein Überstreichen oder Verputzen von Naturwerksteinen ist bei allen anderen Gesteinsarten nur sehr selten zu beobachten. Bei den Graniten weisen 40 von 101 untersuchten Gebäuden Farbanstriche auf den Sockelgesteinen auf. Nicht wenige dieser Behandlungen wurden in allerjüngster Zeit im Zuge von Renovierungen vorgenommen.

Die Farbschicht, und besonders ein Ölfarbanstrich, dichtet die Oberfläche eines Gesteins wirkungsvoll gegen einen Feuchtigkeitsaustausch zwischen Gesteinsporenraum und Atmosphäre ab. Feuchtigkeit, die sich im Gesteinsinneren

befindet, bzw. durch Kondenswasserbildungen von der Rückseite oder durch kapillaren Wasseraufstieg von unten her ins Gestein eindringt, wird so an der Verdunstung über die Gesteinsaußenfläche gehindert; sie hält den Stein über längere Zeit hinweg feucht und dringt schließlich durch kleine Risse und Poren in der Farbschicht nach außen. An diesen Stellen konzentrieren sich Salze, welche nach relativ kurzer Zeit die Farbschicht und mit ihr die obersten, in- zwischen durch die Salztätigkeit mürbe gewordenen Mineralkornschichten aus dem Gesteinsverband abstoßen. Die weitere Abwitterung erfolgt analog zur schuppigen Abschälung in Form von Ausplatzungen kleinerer, flacher Gesteinsteile, als Abblättern, Abschuppen, Abgrusen, wobei häufig Ausblühungssalze sichtbar mit beteiligt sind. Manchmal bläht sich die Farbschicht mitsamt einer äußeren Lage von Gesteinskörnern vor dem Aufplatzen beulenförmig auf. Der Zusammenhalt zwischen Farbe und Gesteinsmineralien ist im Bereich der mürbe gewitterten, äußeren Schicht deutlich stärker als derjenige zwischen den Silikatmineralien untereinander.

Alle überstrichenen Sockelstrecken entwickeln die genannten Schädigungen. Meist ist die Farbschicht bereits größtenteils abgewittert und nur noch in wenigen Resten vorhanden. Frische Anstriche auf bereits abgewitterten Oberflächen blättern bereits nach sehr kurzer Zeit von dem meist nicht genügend stabilisierten und zudem salzhaltigen Untergrund ab.

6.4.3. Expositionsdauer

Die schalige Abwitterung der nordostbayerischen Granite zieht sich, wie bereits erwähnt, bei den meisten Vorkommen über einen längeren Zeitraum hin. Dabei können bei den in der Münchner Innenstadt untersuchten Gesteinen folgende Stadien unterschieden werden:

Zunächst verschmutzen bzw. verkrusten die Gesteinsoberflächen. Es dauert vermutlich längere Zeit, bis die ersten wirklichen Gesteinsschäden auftreten, also sichtbare Schalenablösungen oder kleinteiliges Abschuppen der Gesteinsoberfläche. Schließlich wird nach Abwittern der mutmaßlich mechanisch vorgeschädigten äußeren Gesteinsschicht ein - vorläufiger ? - Endzustand erreicht. Die derart "abgewitterte" Oberfläche stabilisiert sich, entweder weil die tieferen Gesteinsschichten primär intakt und gegen Verwitterungsangriffe weitgehend resistent sind, oder weil innerhalb der Expositionsdauer der untersuchten Granite von maximal etwa 150 Jahren sich keine tiefer greifenden Schädigungen entwickeln konnten. Auf den abgewitterten, stabilen Oberflächen können erneut Schmutz und Gipskrustenbildungen anhaften.

Komplizierter wird das Bild durch Renovierungsmaßnahmen, welche die Verwitterungsprozesse durch Entfernen der lockeren und noch mürben Gesteinsteile vorzeitig zum vorläufigen Abschluß bringen oder sie, z.B. in Fällen von Farbanstrichen, in Richtung einer beschleunigten Abwitterung hin beeinflussen.

Der zeitliche Ablauf dieser Verwitterungsvorgänge läßt sich an einem einzelnen Gebäude nicht aufzeigen, das ja nur einen momentanen Zustand innerhalb des Verwitterungsprozesses wiedergibt. Zusätzlich wird die Interpretation der Befunde

dadurch erschwert, daß an einer Sockelstrecke in der Regel gleichzeitig stark abgewitterte, leicht geschädigte und intakte Oberflächenbereiche vorkommen.

Betrachtet man jedoch die Gesamtheit der in Frage kommenden Gebäude nach deren Verbaualter und richtet die Aufmerksamkeit auf das jeweils am weitesten fortgeschrittene Stadium der Abwitterung, so sollte es möglich sein, eine statistische Abhängigkeit des Verwitterungsprozesses von der Expositionsdauer herausarbeiten zu können. Dies wurde mit der Aufstellung in Tabelle 60 (a und b) versucht.

In Tabelle 60 sind 73 der insgesamt 101 untersuchten Gebäude bzw. Gebäudeteile in der Reihenfolge des Verbaualters ihrer Granitsockelsteine aufgelistet. Die Stadien des Verwitterungsfortschrittes wurden wie folgt zusammengefaßt:

- verschmutzt, verkrustet
graue Schmutzauflagerung; schwarze Lackkruste; schwarze Gipskruste
- Aufbeulen
beginnendes Ablösen der sich bildenden Schale vom Restgestein
- Schalenablösung
Schalenabwitterung in Form von Schalenabplatzungen oder schuppiger Abwitterung
- abgewittert
Oberflächenschicht abgewittert; neue Gesteinsoberfläche gefestigt
- renoviert
Gesteine renoviert und/oder überstrichen
- abgewittert/renoviert + verkrustet
Schmutzauflagerungen oder Verkrustungen auf bereits abgewitterter, gefestigter Oberfläche.

Aus Tab. 60 geht hervor, daß die nordostbayerischen Granite in München, die in der Hauptsache im 19. Jahrhundert (ab etwa 1840) und in der Gründerzeit (bis etwa 1910) verbaut worden sind, alle zumindest das Schadensstadium der Schalenabwitterung erreicht haben. Die Mehrzahl der Gebäude weist bereits 'abgewitterte' Bereiche auf, viele Vorkommen sind renoviert, und auf manchen abgewitterten und renovierten Oberflächen haben sich bereits wieder Verschmutzungen und Verkrustungen angesiedelt.

Deutlich signifikante Unterschiede im Verwitterungszustand zwischen den Granitsockelstücken von 1910 und solchen von 1850 sind auf den ersten Blick nicht auszumachen. Bei den 3 ältesten Vorkommen von 1740, 1820 und 1826 (alle renoviert), ist die Phase der lockeren Abwitterung beendet, was auf einen zeitabhängigen Entwicklungsprozeß hindeuten könnte. Allerdings liegen gleichartig abgewitterte (und renovierte) Werkstücke auch von 1888, 1897, 1898, 1899 und

Lokalität	Baujahr	Verwitterungszustand					
		verschmutzt verkrustet	Aufbeulen	Schalen- ablösung	abgewittert	renoviert	abgewittert /renoviert+ verkrustet
Prannerstr.2	1740					R	
Wittelsbacher Platz 1	1820					R	
Ludwigstr. 3	1826					R	x
Odeonsplatz 11	1826			x	x		
Prof.-Huber-Platz 2	1839	x		x			
Geschw.-Scholl-Platz 1	1840	x	x	x	x		x
Prof.-Huber-Platz 1	1841	x		x	x		x
Ludwigstr. 23	1843	x		x	x		
Maximilianstr. 6	1859	F/x		x	x		
Maximilianstr. 45	1859				x	----	F
Maximilianstr. 47	1859			x	x	----	F
Maximilianstr. 33	1862			x	x	----	F
Maximilianstr. 12	1864	x	-----	x	x	----	R
TU-Hauptgebäude (Süds.)	1868	x	x	x	x		x
TU-Hauptgebäude (Osts.)	1868				x	-----	R
Neues Rathaus (Osts.)	1874	x		x	x		x
Neues Rathaus (Nords.)	1874	F		F	F/x		x
Hackenstr. 3	1874			x	x		
Thierschstr. 46	1877				x	?R	
Altes Rathaus	1877					R	x
Am Kostor 3	1881		F	F			
Herrnstr. 21	1882	x	x	x	x		
Heilig-Geist-Kirche	1885	F/x	-----	F/x	x	----	R
K. Faulhaberstr. 14	1886				x	-----	?R
Neuhauser Str. 51	1887					R	x
TU-Hauptgebäude (Hof)	1887	x		x	x		
Promenadeplatz 12	1888					R	
Lenbachplatz 3	1889	x/F	x/F	x/F			
Alzheimer Eck 9	1890				x	-----	F
Sendlinger Str. 42	1891	x	x	x	x		x
Neues Rathaus (Osts.)	1893	x		x	x		
K. Faulhaberstr. 1	1894				x	-----	R
Tal 19	1894			x	x	-----	F
Brunnstr. 6	1894			x	x	-----	F
Karolinenplatz 6	1895		x		x	-----	?R

- x am Gebäude deutlich ausgebildete Verwitterungserscheinung
 F Granitsockel mit Ölfarbe überstrichen
 x/F Sockel nur teilweise überstrichen
 F/x nur noch Farbreste erhalten
 x---F abgewitterte Oberfläche neu überstrichen; weitgehende Abwitterung neu überstrichener Flächen
 R renovierte Oberfläche
 ?R wahrscheinlich renovierte Oberfläche
 x---R weitergehende Abwitterung trotz Renovierung; alte Abwitterungsspuren nach Renovierung noch deutlich sichtbar

Tab. 60a: Expositionsdauer und Verwitterungszustand von Granitsockelgesteinen mit Verbaudaten zwischen 1740 und 1895

Lokalität	Baujahr	Verwitterungszustand					
		verschmutzt verkrustet	Aufbeulen	Schalen- ablösung	abgewittert	renoviert	abgewittert /renoviert+ verkrustet
Maximiliansplatz 19	1896	x	x	x	-----	?R	
Prinzregentenstr. 24	1896	x	x	x	-----	?R	
Maximiliansplatz 18	1897	x		x	x		
Am Platzl 9	1897	x	x	x	x		
Alter Justizpalast	1897	x	x	x	x		x
Oberanger 9	1897	x	x	x	x		
Heiliggeiststr. 6	1897	F/x		x			
Westenriederstr. 20	1897	F/x		x			
Tal 67	1897					R	
K. Faulhaberstr. 10	1898	x		x			
Lenbachplatz 2 (D.Bank)	1898	x	x	x	x	R	x
Brienerstr. 22	1898					R	x
Prinzregentenstr. 26	1898		x		x	R	
Liebfrauenstr. 1	1899					R	
Herzogspitalstr. 20	1899	F	F	F			
Brunnstr. 7	1899			x	x	F	
TU-Hauptgebäude (Nords.)	1899	x	x	x			
Prinzregentenstr. 3	1899	x		x	x		
Viktualienmarkt 5	1899		x		x	F	
Tal 37	1900			F			
Sendlinger Str. 35	1900	F		x	x		
Karlsplatz 7, 8, 9	1902				x	R	
Karlsplatz 11, 12	1902			x/F	x	x/F	
Kaufingerstr. 32	1904					R	
Theatinerstr. 38	1904	x			x		x
Lenbachplatz 5	1904	x		x			
Armeemuseum	1905	x	x	x	x		
Lenbachplatz 6	1905	x		x			
Rindermarkt 10	1905	F			F		
Max-Joseph-Str. 9	1906				x	R	
Neuhauser Str. 40	1908		x		x	R	
Neues Rathaus (Wests.)	1908	x		x			
TU-Hauptgebäude (Wests.)	1910	x	x	x			
Ottostr. 16	1910	F		F			
Blumenstr. 26	1929	x	x	x	x		x
Neue Pinakothek	1980						
Blumenstr. 20	1980						
Viktualienmarkt 15	1980						

- x am Gebäude deutlich ausgebildete Verwitterungserscheinung
 F Granitsockel mit Ölfarbe überstrichen
 x/F Sockel nur teilweise überstrichen
 F/x nur noch Farbreste erhalten
 x--F abgewitterte Oberfläche neu überstrichen; weitgehende Abwitterung neu überstrichener Flächen
 R renovierte Oberfläche
 ?R wahrscheinlich renovierte Oberfläche
 x--R weitergehende Abwitterung trotz Renovierung; alte Abwitterungsspuren nach Renovierung noch deutlich sichtbar

Tab. 60b: Expositionsdauer und Verwitterungszustand von Granitsockelgesteinen mit Verbaudaten zwischen 1896 und 1980

1904 vor, so daß die Häufung am Beginn der Zeitreihe auch zufällig sein kann. Die jüngsten Vorkommen von 1908, 1910 und 1920, nimmt man die Gebäude der Stadtwerke von 1929 einmal aus, weisen dagegen noch keine 'abgewitterten', nach der Schalenablösung gefestigten Flächen auf. Auch hier könnte es sich um eine zufällige Hintereinanderreihung handeln.

Faßt man die Vorkommen größerer Zeitabschnitte zusammen und vergleicht die Häufigkeiten der jeweils am wenigsten bzw. der am weitesten fortgeschrittenen Verwitterungsstadien untereinander (Tab. 61), so zeigt sich, daß die älteren Vorkommen vor 1870 nur zu 47 % noch verschmutzte bzw. verkrustete Originaloberflächen auf einzelnen Werkstücken aufweisen, dagegen zu 93 % bereits vollständig abgewitterte oder renovierte Sockelquader besitzen. Bei den Graniten aus der Zeit zwischen 1890 und 1910 beträgt der Anteil der Gebäude mit noch erhaltener Originaloberfläche 68 %, während 73 % der Vorkommen den 'abgewitterten' Zustand erreicht haben. Der Anteil der Vorkommen, die auf den abgeschalteten Oberflächen bereits wieder Verschmutzungen und Verkrustungen angelagert haben, liegt bei den Gesteinen vor 1890 zusammengekommen bei 32 %, bei den Gebäuden nach 1890 erreicht er erst 17 %.

	Zahl der Vorkommen	davon:		
		verschmutzt verkrustet Aufbeulen	abgewittert renoviert	abgewittert; renoviert+neu verkrustet
Vorkommen vor 1870	15	47 %	93 %	32 %
1870 - 1889	13	54 %	85 %	
1890 - 1910	41	68 %	73 %	17 %
Zusammen	69	62 %	80 %	22 %

Tab. 61: Verwitterungsfortschritt an Granitsockelsteinen mit Verbaudaten zwischen 1740 und 1910

6.4.4. Expositionsrichtung

Analog zur Vorgehensweise bei den Salzschäden (vgl. 6.2.4.) wurden die Verwitterungserscheinungen an nordostbayerischen Graniten auf ihre Expositionsabhängigkeit hin untersucht. Die Expositionen der Gebäudefassaden mit Granitvorkommen im Sockelbereich wurden dazu in 15°-Schritten ausgemessen. Dann wurden die Zahlen der Fassadenstrecken mit vorhandenen Formen der schaligen Abwitterung in Beziehung gesetzt zu den Gesamtzahlen der Vorkommen innerhalb der 15°-Sektoren. Die Abweichungen vom Mittelwert des insgesamt geschädigten Anteils (85 %) sind in Abb. 71 aufgezeichnet.

Die durch gleitende Mittelbildung über jeweils 3 Einzelwerte entstandene Kurve zeigt fast denselben Verlauf wie die Kurve der Ausblühungsschäden (Abb. 41), was den Schluß zuläßt, daß die schalige Abwitterung der Granite zu einem Teil durch die Wirkung rasch löslicher Salze gesteuert wird. Eine relativ hohe Schadenszahl von über 90 % der Vorkommen ist an östlich exponierten Fassaden festzustellen, dort wo Salze sich weitgehend ungestört akkumulieren können. Ein geringerer Schädigungsgrad von unter 80 % besteht an den nach Westen gerichteten Fassaden, wo durch häufig und reichlich abfließendes Niederschlagswasser Salze ausgespült und locker gewitterte Gesteinsteile abgetragen werden. Eine leicht erhöhte Schadenszahl liegt im südwestlichen Sektor vor, verursacht wahrscheinlich durch den wärmenden, den Kapillarwasserdurchsatz und die Salzkristallisation fördernden Einfluß der Insolation, die im Verbund mit der Lufttemperatur besonders am Nachmittag und somit auf den SW-Seiten ihre Wirkung entfalten kann.

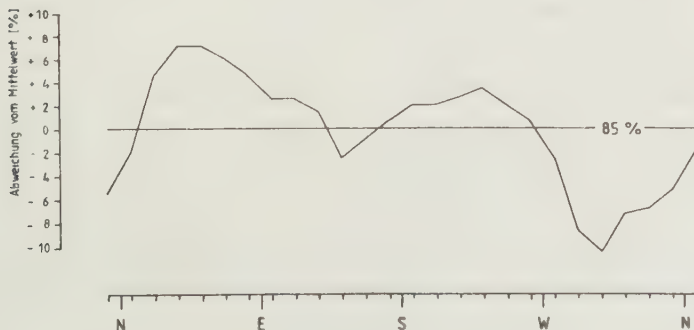


Abb. 71: Relative Schadenshäufigkeiten von "abschalenden" Granitsockelstrecken in Abhängigkeit von den Expositionsrichtungen

7. ZUSAMMENFASSUNG

Vorliegende Arbeit entstand auf der Grundlage eines durch die Stiftung Volkswagenwerk finanziell unterstützten Forschungsvorhabens zum Thema "Verwitterung von Naturwerksteinen in München in Abhängigkeit von Zeit und Ort". Das Vorhaben wurde geleitet von Prof. Dr. W.-D. GRIMM und durchgeführt am Institut für Allgemeine und Angewandte Geologie der Universität München.

Die Forschungsarbeit gliedert sich in 3 Teilbereiche:

- Kartierung der Werksteinvorkommen und der Verwitterungserscheinungen an Werksteinen in der Münchner Innenstadt,
- Aufzeichnung der für München wichtigsten Verwitterungsfaktoren,
- Beispielhafte Analysen bestimmter Verwitterungsarten.

Für die Untersuchungen wurde ein fest umrissenes Kartiergebiet abgegrenzt. Es umfaßt die gesamte Münchner Altstadt innerhalb des "Altstadtringes" sowie die im 19. Jahrhundert angelegten Stadterweiterungen Maxvorstadt, Ludwigstraße, Prinzregentenstraße und Maximilianstraße.

Kapitel 2: Allgemeine Stadtkartierung

Im genannten Untersuchungsgebiet wurden alle Naturwerksteinvorkommen im Außenbereich (Gesteine an Gebäudefassaden und an freistehenden Objekten (Brunnen, Denkmäler, Aufgänge von Unterführungen etc.)) kartiert.

Bei der Kartieraufnahme wurden besonders berücksichtigt:

- Die Bauverwendung der Natursteinteile (als Sockelverkleidung, Stufen, Namensschilder etc.);
- die verarbeiteten Gesteinsarten;
- die sichtbaren Verwitterungserscheinungen an den Werksteinen;
- die Verbaualter der Werkstücke.

Die Beobachtungen sind in vereinheitlichter Form in einem 330 Seiten umfassenden Kartiertext niedergelegt. Kartendarstellungen der wichtigsten Kartielergebnisse sind der Arbeit als Anlagen beigelegt:

- | | |
|--------------------------------------|--------------------|
| Stadtkarte 1: "Gesteinsarten" | (Anlage 1a und 1b) |
| Stadtkarte 2: "Verwitterungszustand" | (Anlage 2a und 2b) |
| Stadtkarte 3: "Expositionsauer" | (Anlage 3a und 3b) |

In dem bearbeiteten Stadtgebiet mit einer Ausdehnung von 2,3 km² befinden sich 1156 Gebäude bzw. Gebäudekomplexe mit einer straßenseitigen Gesamtfassadenlänge von etwa 60 km. Zwei Drittel der Gebäude besitzen an ihren Außenfassaden Bauteile aus Naturstein in Form von Stufen, Bodenbelägen, Sockelleisten, Sockelverkleidungen, Tür- und Fenstergewänden, Fensterbänken, Brüstungen, Wandverkleidungen, Portalteilen, Balustraden, Balkonen, Erker. Darüber hinaus befinden sich im Arbeitsgebiet 70 Denkmäler und Plastiken sowie 49 Brunnenanlagen aus Naturstein bzw. mit Natursteinverwendung neben zahlreichen weiteren Objekten aus Naturstein wie Aufgängen von Unterführungen, Gartenmauern, Laternensockel, Blumenkästen, Prellsteine, Gedenktafeln, Epitaphien u.a.m.

Die am häufigsten verbauten Gesteinsarten in der Münchner Innenstadt sind der Muschelkalk und die (verschiedenen) Granite. Bei Fassadenverkleidungen dominieren Muschelkalk, Donaukalk und Travertine, bei Bodenbelägen Granite, Treucht-

linger Kalk, Muschelkalk und Gneise, bei Stufen bzw. Schwellen Granite, Muschelkalk und Gneise, bei Denkmälern, Plastiken und Brunnen Granite, Donaukalk und Muschelkalk, bei Schrifttafeln und Epitaphien die roten Knollenkalke, bei Verkleidungen von Unterführungen schließlich die italienische Ceppo-Nagelfluh.

Von der Seite der Gesteinsarten her betrachtet zeigt sich, daß beispielsweise die Granite vor allem als Stufensteine und als Sockelverkleidung Verwendung gefunden haben, Muschelkalk überwiegend als Material für Fassadenverkleidungen, Solnhofener Kalk als Bodenbelag; Rosenheimer Kalk und Enzenauer Kalk stellen ausgesprochene Denkmalgesteine dar.

Die Vielfalt der bei der Kartierung aufgezeichneten Verwitterungserscheinungen an Naturwerksteinen wurde nach phänomenologischen Gesichtspunkten klassifiziert in einer Liste von 75 Einzelercheinungen (= "Erscheinungen 1. Ordnung" = kleinste, für sich allein definierbare Verwitterungserscheinungen), die in 5 Gruppen zusammengefaßt wurden:

1. Bearbeitungsart der Oberfläche
2. Durchfeuchtung
3. Verfärbung und Entfärbung
4. Stoffanhaftung, Stoffneubildung, Stoffumbildung
5. Zerteilung und Materialverlust

Kapitel 3: Werksteinarten

Die vielen zu Werksteinen verarbeiteten Gesteinsarten wurden gegliedert in 34 Gesteinsgruppen:

Carbonatgesteine und kr. Marmore

Muschelkalk
Donaukalk
Travertin
Treuchtlinger Kalk
Knollenkalke
Sonstige Carbonatgesteine
Kristalline Marmore
Frankendolomit
Kalktuff
Wallenfels Kalkstein
Solnhofener Kalk
Botticino Kalk
Untersberger Kalk
Devonkalke
Zola-Repen-Kalkstein
Rosenheimer Kalk
Enzenauer Kalk

Silikatische Kristallingesteine

Granite
Gneise
Dunkle magmatische Gesteine
Serpentinit
Kristalline Schiefer
Glimmerschiefer, Phyllite
Basalt-Lava
Larvikit
Trachyt-Tuff
Suevit
Porphyrit

Klastische Sedimentgesteine

Bayerische Nagelfluh
Italienische Ceppo-Nagelfluh
Sonstige Sandsteine
Grünsandstein
Buntsandstein
Tonschiefer

Die vorgestellte Gliederung stellt einen Kompromiß dar zwischen petrographischer Klassifizierung, der Nomenklatur des Natursteinhandels und den praktischen Erfordernissen einer raschen Gesteinsansprache im Gelände. Die Reihenfolge innerhalb der 3 Gesteinsgroßgruppen richtet sich nach der Häufigkeit der Vorkommen im kartierten Gebiet. Die einzelnen Gesteinsarten werden nach Petrographie, Entstehung, Herkunft und Vorkommen kurz vorgestellt.

Kapitel 4: Expositionsdauer

Die Kenntnis der Expositionsdauer der Werksteine erlaubt zum einen Rückschlüsse auf den zeitlichen Ablauf von Verwitterungsvorgängen, zum anderen Aussagen über die Verwendung von Naturwerkstein in den verschiedenen Zeitepochen.

Die Baudaten vieler natursteintragenden Gebäude und Objekte können aus Literaturangaben u.ä. in Erfahrung gebracht werden. Wichtiger für das Verwitterungsge-schehen sind jedoch die Verbaudaten der Werksteine selbst. Hier müssen eine Reihe von Komplikationen beachtet werden: Renovierungsarbeiten, Austausch einzelner Stücke und ganzer Fassadenverkleidungen, Umbauten, Kriegszerstörungen und Wiederaufbau.

München wurde 1158 gegründet. Die bis heute überlieferte Anlage der Altstadt geht auf die Stadterweiterungsphasen des 12. und des 14. Jahrhunderts zurück. Im 19. Jahrhundert erfolgten die Anlagen der Maximiliansvorstadt, der Ludwigstraße, der Prinzregentenstraße und der Maximilianstraße.

Nur wenige Bauwerke sind aus der Zeit vor dem 19. Jahrhundert erhalten, ihr Naturwerksteinbestand wurde großenteils mehrfach renoviert oder durch neuere Stücke ersetzt. Ab etwa 1830 macht sich die Bautätigkeit LUDWIGS I. in einer steigenden Zahl natursteintragender Repräsentationsbauten und Denkmäler bemerkbar. Einen ersten quantitativen Höhepunkt erreicht die Natursteinverwendung mit den zahlreichen Neu- und Umbauten der Gründerzeit zwischen etwa 1880 und 1910. Die Hauptmenge des heutigen Natursteinbestandes stammt aus den Jahrzehnten des Wiederaufbaus nach dem 2. Weltkrieg.

Vor der Regierungszeit LUDWIGS I. kamen vorwiegend Gesteine aus der näheren Umgebung Münchens und Oberbayerns zum Verbau: Nagelfluh, Kalktuff, rote Knollenkalke aus dem Salzburgerischen. Mit LUDWIG I. gelangten zusätzlich Regensburger Grünsandsteine, Donaukalke und Untersberger Kalke nach München. In der Gründerzeit waren Muschelkalke und Granite aus dem bayerischen Grundgebirge die am meisten verbaute Gesteine. Seit dem 2. Weltkrieg stellen Muschelkalk, Donaukalk, Treuchtlinger Kalk, Frankendolomit und Brannenburger Nagelfluh die Hauptmenge an Werksteinen aus Bayern. Aus dem Ausland kommen in etwa vergleichbaren Mengen Travertine, Ceppo-Nagelfluh, verschiedene Granite und Gneise, Serpentinite und kristalline Marmore.

Kapitel 5: Ursachen der Werksteinverwitterung

Bei der Zusammenstellung der Verwitterungsfaktoren und der durch sie ausgelösten Verwitterungsvorgänge wurde von dem herkömmlichen Schema der physikalischen, chemischen und biologischen Verwitterung bewußt abgegangen. Um den komplexen Wirkungszusammenhängen gerechter werden zu können, wird eine Gliederung nach 10 Einflußfeldern vorgeschlagen:

- | | |
|-----------------------------|--|
| 1. Umfeld (Klima, Baugrund) | 6. Inhaltsstoffe in Luft und Wasser |
| 2. Gestein | 7. Organismen |
| 3. Temperatur und Strahlung | 8. Schwerkraft |
| 4. Luft und Luftbewegung | 9. Zeit |
| 5. Wasser | 10. Mittelbare und unmittelbare anthropogene Einflüsse |

Die Beschreibung der einzelnen Verwitterungsfaktoren bezieht sich - wo möglich - auf die speziellen Münchner Verhältnisse. In Tabelle 19 der Arbeit (S. 66 - 71) ist eine tabellarische Zusammenfassung der Verwitterungsfaktoren, der durch sie ausgelösten Verwitterungsvorgänge und der resultierenden Verwitterungserscheinungen gegeben.

Kapitel 6: Analysen von Verwitterungserscheinungen

In Kapitel 2 wurden Verwitterungs-Einzellerscheinungen als "Erscheinungen 1. Ordnung" bezeichnet. Viele dieser Einzellerscheinungen treten im Rahmen bestimmter Verwitterungsvorgänge in gesetzmäßigen Kombinationen zusammen mit anderen Einzellerscheinungen auf und bilden dann "Verwitterungserscheinungen 2. Ordnung".

Von solchen Erscheinungen 2. Ordnung werden beispielhaft untersucht:

- Schäden durch Ausblühungssalze im Sockelbereich von Gebäuden,
- Verwitterung des Muschelkalks,
- Schalenverwitterung nordostbayerischer Granite.

Zuvor werden kurz die weniger komplexen Erscheinungen mechanisch verursachter Bruchschäden angesprochen. Den einzelnen Untersuchungen liegt jeweils eine gesondert erstellte, spezielle Kartieraufnahme zugrunde.

Die Zahl der Bruchschäden an Werksteinen in der Münchner Innenstadt ist hoch. Fast 5000 gebrochene oder beschädigte Werkstücke wurden gezählt, deren Wiederherstellung unter Beseitigung der Schadensursachen Kosten in Höhe von 1 bis 2 Mio. DM verursachen würde. Bruchschäden entstehen durch Stöße und Schläge, durch Gebäude- und Baugrundsetzungen oder durch mechanische Dauerbelastungen. Falsche Gesteinsauswahl oder ein fehlerhafter Verbau können die Entstehung derartiger Schäden provozieren.

Etwa ein Drittel der 770 natursteintragenden Gebäude der Innenstadt weist Ausblühungen bzw. Schäden durch Ausblühungssalze in den Sockelbereichen auf. Besonders anfällig zeigen sich die klastischen Sedimentgesteine und Konglomerate, bei denen zwischen 60 und 80 % der Vorkommen derart beeinträchtigt sind. Sehr geringe Schadenszahlen durch Ausblühungen von unter 10 % der Vorkommen sind bei Gneisen, kristallinen Schiefern und auch beim Travertin zu beobachten. Einige Gesteinsarten (z.B. Larvikite und kristalline Marmore) weisen an den Vorkommen der Innenstadt weder Salzschaäden noch Ausblühungsbesatz auf.

Die auftretenden Schadensformen, die je nach Gesteinsausbildung und Angriffsart der Salze sehr unterschiedlich ausgeprägt sein können, wurden zu Vergleichszwecken unter den 4 Oberbegriffen

- nur Ausblühungen
- Rauhwitterung (abgewitterte Oberfläche ohne lockere Teile)
- Absanden (lockerer Gesteinszerfall in Einzelkornpartikel)
- Ausbrüche (lockerer Gesteinszerfall in größeren, zusammenhängenden Stücken)

zusammengefaßt.

Darüber hinaus wurden die Schadensintensitäten bewertet durch Einteilung der Beobachtungsdaten in die 3 Kategorien 'schwache Schäden', 'stärkere Schäden' und 'starke Schäden'. Ein Vergleich der Schadenssituationen an den Sockelbereichen insgesamt mit den Schadensintensitäten im Bereich von Gebäudeeingängen zeigt, daß in der Nähe der Eingänge allgemein intensivere Schäden zu verzeichnen sind, als Folge der winterlichen Salzangriff des Eingangswege und aufgrund von eingeschlepptem salzhaltigem Schneematsch durch den Fußgängerverkehr.

Betrachtet man die Abhängigkeit der Schadenshäufigkeiten und -intensitäten von den Expositionsrichtungen der Gebäudefassaden, so ergibt sich, daß die meisten Salzschaäden auf ostexponierten Fassadenseiten vorkommen (knapp 50 % der ostorientierten Sockelstrecken aus Naturstein weisen Salzschaäden auf). Die relativ geringsten Schadenszahlen (mit etwa 15 % des Bestandes) treten an den nach SW, W und N gerichteten Flächen auf. Für diese Art der Verteilung ist im wesentlichen die Wirkung des Schlagregens verantwortlich zu machen, der auf den Westseiten die Fassadenflächen von Staub, locker gewitterten Teilchen und Salzen freispült, während sich auf den Regenwind-abgewandten Ostseiten Schmutzstoffe und Salze akkumulieren können. Ein zweites, kleineres Schadensmaximum ist im

Süden ausgebildet, das offenbar auf die erwärmende, trocknende und die Salzhydratation und -dehydratation fördernde Insulationsbestrahlung zurückgeht.

Chemische Analysen der Ausblühungssalze zeigen, daß im wesentlichen 2 Typen von Salzkombinationen, unabhängig von der betroffenen Gesteinsart, vorkommen:

- Ein $\text{NaCl} - \text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ - Typ, der sich vor allem durch aufgenommenes Streusalz entwickelt. In der konzentrierten Kochsalzlösung können gleichzeitig größere Gipsmengen aus dem Straßenstaub herausgelöst werden.
- Ein $\text{MgSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O} - (\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O})$ - Typ, der auf eine Auslaugung von Mörtelstoffen durch kapillar aufgenommenes Wasser hinweist.

In allen untersuchten Salzproben lassen sich Stickstoffverbindungen als Nitrate, Nitrite und Ammoniumsalze nachweisen, die ihren Ursprung vermutlich in den Emissionen des Kraftfahrzeugverkehrs haben, nachdem im heutigen München Fäkalverunreinigungen kaum mehr eine Rolle spielen.

Das am meisten verbauten Gestein in der Münchner Innenstadt ist der Muschelkalk als calcitisch fest gebundener Kernstein oder als farblich interessante Blaubank oder Goldbank, die höhere Anteile an leichter verwitterbarer, feinkörniger Kalkmatrix enthalten.

Auf den Bauteiloberflächen, die dem Schlagregen oder dem Ablaufwasser ausgesetzt sind, wittert das Gestein rau aus. Beim Kernstein kommt es dabei meist nur zu einer Anwitterung, ohne daß eigentliche Gesteinsschäden auftreten; die Blaubank-Varietäten reagieren auf die Schlagregenbeanspruchung dagegen mit größerem Materialverlust.

Die regengeschützten Flächen setzen im Lauf der Zeit schwarze Gipsbeläge an. Aus der Luft angelagerte SO_2 -Moleküle reagieren in der Kondensfeuchtigkeit mit Gesteinscarbonat oder Carbonatstaub zu Gips, der durch einwachsenden Rußanflug eine tief schwarze Farbe annimmt. Es treten Erscheinungen auf wie gleichmäßig dünne 'dunkle Beläge', 'netzartige Dunkelung' oder 'Tigerflecken'.

Nach längerer Expositionszeit bzw. bei stärkerer Verschmutzungsrate kommt es zur Ausbildung dickerer und wulstartiger 'Gipskrusten', die sich örtlich zum 'Zäpfchensinter' verstärken können. In Kapillarsaumbereichen oder an Sickerwasservorkommen kann der normalerweise relativ beständige Krustengips aufgelöst werden und zu lockeren, weißen Ausblühungsgipsen umkristallisieren.

Die verschiedenen Verwitterungserscheinungen des Muschelkalks werden durch REM-Aufnahmen veranschaulicht.

Eine statistische Betrachtung der Expositionsdauer der verbauten Muschelkalk-Werksteine zeigt, daß vor dem 2. Weltkrieg vor allem Kernsteine in Form von mehr oder weniger massiven Quadern verbaut worden sind. In den Jahren des Wiederaufbaus nach dem 2. Weltkrieg fanden dünn geschnittene Blaubank-Gesteine als Fassadenverkleidungen reichlich Verwendung. Aufgrund der Verwitterungsanfälligkeit dieses eigentlich nur für Innenräume geeigneten Materials kommt heute wieder dem Kernstein größere Bedeutung zu. Leichte Gipsanflüge ('Dunkelung') werden bereits nach wenigen Jahren der Exposition sichtbar, deutlich gipsverkrustete oder stärker abgewitterte Oberflächen haben mindestens 25 Jahre Exposition hinter sich.

Die Abhängigkeit der Verwitterungserscheinungen von den Expositionsrichtungen der Werksteine macht sich besonders deutlich bemerkbar bei der 'Rauhen Abwitterung' (50-60 % der Schlagregenseiten sind abgewittert) und bei der 'netzartigen Dunkelung', von der etwa 40 % der Ostfassaden und nur 10-15 % der Westseiten betroffen sind.

Ein interessantes Phänomen stellt die schalige Abwitterung von Naturwerksteinen dar, von der in München besonders die Granite aus dem Bayerischen Wald (Schalenverwitterung nordostbayerischer Granite) betroffen sind. Sie wurden vor allem in der Gründerzeit (1880-1910), meist mit gestockt bearbeiteter Oberfläche verbaut.

Der Verwitterungsablauf an diesen Gesteinen beginnt mit einer Vergrauung (Staubauflagerung) oder Verkrustung (schwarze Gipskruste, schwarze 'Lackkruste' aus Ruß) oder auch gleichzeitig einer Rostverfärbung.

Die Schalenablösungen können sich auf zweierlei Weise vollziehen: Einmal durch das Aufwölben und Aufbrechen wirklicher Gesteinsschalen, die sich in Dicken von wenigen Millimetern bis zu 2 Zentimetern vom Restgestein lösen und stückweise abfallen. Zum anderen kann sich die äußere Gesteinspartie ('Schale') durch Abbröckeln, Abschuppen, Abblättern, Abgrusen etc. zerteilen. Das 'schuppige Ablösen' endet, ebenso wie die 'echte' Schalenablösung in einer Tiefe von max. 2 Zentimetern. Hier stabilisiert sich das abgewitterte Gestein; es kann erneut zur Vergrauung und Verkrustung kommen. Als Ursache für die Schalenverwitterung wird eine mechanische Vorschädigung des Gesteins durch die Oberflächenbearbeitung, speziell durch das Stocken, vermutet. Entstehende Mikrorisse schwächen das Gesteinsgefüge und geben kapillar aufgenommenem Wasser und auskristallisierenden Salzen Raum zur Ausbreitung.

Fast alle gestockten Granitvorkommen aus der Gründerzeit weisen Schalenablösungen auf; die meisten dieser Ablösungsprozesse sind an nicht renovierten Werkstücken noch heute im Gang.

Die Schadensverteilung über die Expositionsrichtungen hinweg ähnelt stark der entsprechenden Verteilung bei den Ausblühungssalzen: Größte Schadenshäufigkeit im Osten (90 %), geringste Zahlen im Westen (75 %), ein zweites Schadensmaximum im Süden (ca. 85 %) durch die Wirkung der Insolation.

8. ANHANG

8.1. Literaturverzeichnis

- ALCKENS, A. (1936): Die Denkmäler und Denksteine der Stadt München. - 200 S., München (Callwey).
- ARNOLD, A. (1976): Behaviour of some soluble salts in stone deterioration. - 2nd Int. Symp. on the Deterioration of Building Stones, 27-36, Athen.
- ARNOLD, A. (1981): Salzmineralien in Mauerwerken. - Schweiz. mineral. petrogr. Mitt. 61, 147-166, Zürich.
- ARNOLD, A. (1984): Umgang mit Schäden durch lösliche Salze. - Kolloquium über Steinkonservierung, Münster, 66-81, Erlangen (Inst. f. Werkstoffwiss. der Univ.).
- BAUER, R. (1983): Ruinen-Jahre - Bilder aus dem zerstörten München 1945-1949. - 211 S., München (Hugendubel).
- BAUER, R. & GRAF, E. (1985): Stadtvergleich. - 203 S., München (Hugendubel).
- BAYERISCHE STAATSREGIERUNG (1980): 5. Raumordnungsbericht (Stand 77/78). - 296 S., München (Bay. Staatsministerium f. Landesentwicklung u. Umweltfragen).
- BGL (1984): Oberflächennahe mineralische Rohstoffe von Bayern. - Geologica Bavarica 86, 563 S., München (Bayer. Geol. Landesamt).
- BILLER, H.J. & RASP, H.P. (1972): München, Kunst- und Kulturlexikon. - 185 S., München (Süddeutscher Verlag).
- BLfu (1982): Das lufthygienische Landesüberwachungssystem Bayern (LÜB), Siebente Ausbaustufe. - Schriftenreihe des Bayer. Landesamtes f. Umweltschutz 53, 59 S., München/Wien (Oldenbourg).
- BMFT (1977): Zur friedlichen Nutzung der Kernenergie. - 451 S., Bonn (Bundesminister für Forschung und Technologie).
- BOSL, K. (1974): Handbuch der historischen Stätten Deutschlands, Band VII, Bayern. - 949 S., Stuttgart (Alfred Kröner).
- BRAUNFELS, W. (1976): Abendländische Stadtbaukunst. - 359 S., Köln (Du Mont).
- BRUNNER, H. & HOJER, G. (1979): Residenz München. - 136 S., München (Bayerische Verwaltung der staatlichen Schlösser, Gärten und Seen).
- DIN 52.100 (1949): Prüfung von Naturstein. Richtlinien zur Prüfung und Auswahl von Naturstein. - 5 S.
- DIN 52.101 (1965): Prüfung von Naturstein. Probenahme. - 3 S.
- DIN 52.102 (1965): Prüfung von Naturstein. Bestimmung der Dichte. Rohdichte, Reindichte, Dichtigkeitsgrad, Gesamtporosität. - 3 S.
- DIN 52.103 (1972): Prüfung von Naturstein. Bestimmung der Wasseraufnahme. - 2 S.
- DIN 52.104 (1942): Prüfung von Naturstein. Frostbeständigkeit. - 1 S.
- DIN 52.104 (1976): Prüfung von Naturstein. Frostwechselversuch. - 2 S.
- DIN 52.105 (1942): Prüfung von Naturstein. Druckfestigkeit. - 1 S.
- DIN 52.105 (1965): Prüfung von Naturstein. Druckversuch. - 1 S.
- DIN 52.106 (1972): Prüfung von Naturstein. Beurteilungsgrundlagen für die Verwitterungsbeständigkeit. - 6 S.

- DIN 52.107 (1947): Prüfung von Naturstein. Schlagfestigkeit an Würfeln ermittelt (Stoffeigenschaft). - 2 S.
- DIN 52.108 (1968): Prüfung anorganischer nichtmetallischer Werkstoffe. Verschleißprüfung mit der Schleifscheibe nach Böhme. Schleifscheiben-Verfahren. - 3 S.
- DIN 52.111 (1942): Prüfung von Naturstein. Kristallisationsversuch. - 1 S.
- DIN 52.111 (1976): Prüfung von Naturstein. Kristallisationsversuch mit Natriumsulfat. - 2 S.
- DIN 52.112 (1942): Prüfung von Naturstein. Biegefestigkeit. - 1 S.
- DIN 52.113 (1965): Prüfung von Naturstein. Bestimmung des Sättigungswertes. - 2 S.
- DITTMANN, C. (1982): Regensburg - Stadtklima und Luftverunreinigung. - Acta Albertina Ratisbonensia 41, 336 S., Regensburg (Naturwiss. Verein Regensburg).
- DNV (1973): Richtlinien für das Versetzen und Verlegen von Naturwerksteinen. - 7. Aufl., 83 S., Würzburg (Deutscher Naturwerksteinverband e.V.).
- DRABIK, M., FENKES, M. & HARD, G. (1982): Naturwerksteine als Indikatoren. - Geographische Rundschau 34, H. 2, 69 - 75.
- DREXLER, P. (1964): Der Quaderkalk im Hauptmuschelkalk Frankens. - Diss. Univ. Würzburg, 140 S., Würzburg.
- ECKHARDT, F.E.W. (1978): Microorganism and Weathering of a Sandstone Monument. - In: KRUMBEIN, W.E. (ed.): Environmental Biogeochemistry and Geomicrobiology II, 675 - 686, Ann Arbor/Mich.
- ECKHARDT, F.E.W. (1983): Mechanismen bei der Verwitterung von Mineralien und Gestein durch Mikroorganismen. - Sitz.-Ber. Arbeitskreis "Naturwiss. Forsch. an Kunstgütern aus Stein", Hannover, 75 - 84, Erlangen (Inst. f. Werkstoffwiss. d. Univ.).
- ENDLICHER, G. (1984): Petrographisch-mineralogische Untersuchungen der Bausteine und Verwitterungskrusten des Regensburger Domes. - Acta Albertina Ratisbonensia 42, 53 - 80, Regensburg (Naturwiss. Verein Regensburg).
- ENZYKLOPÄDIE (1981): Enzyklopädie Naturwissenschaft und Technik 4, Weinheim (Zweiburg Verlag).
- FEIX, R. & SCHULZE, K.H. (1975): Entwicklung eines Prüfverfahrens für die Hitzebeständigkeit von Naturgestein. - Prüfamt für bituminöse Baustoffe und Kunststoffe der TU München (Unveröff. Forsch.Ber.), 137 S.
- FITZNER, B. (1970): Die Prüfung der Frostbeständigkeit von Naturbausteinen. - Geol. Mitt. 10, 205 - 296, Aachen.
- FRANK, W.H. (1981): Die Naturwerksteine in der Altstadt von Goslar und ihre Vorkommen in der Umgebung der Stadt. - Clausthaler Geol. Abh. 40, 247 S.
- FURLAN, V. & GIRARDET, F. (1983): Considerations on the rate of accumulation and distribution of sulphurous pollutants in exposed stones. - In: Werkstoffwiss. und Bausanierung, WITTMANN, F.H. (Hrsg.), 285 - 290, Ostfildern (Edition Lack & Chemie).
- GEBHARDT, P. (1968): Die geologischen und hydrologischen Verhältnisse beim Münchner U-Bahn-Bau. - Diss. Univ. München.
- GELDDHAUSER, J. (Bearbeiter) (1982): Natursteine. - 3. Aufl., 135 S., München (Lehrstuhl f. Hochbaukonstruktion u. Baustoffkunde der TU München).

- GLOBAL 2000 (1980): Der Bericht an den Präsidenten. - 1438 S., Frankfurt (Zweitausendeins Verlag).
- GRIMM, C. (Hrsg.) (1985): Aufbruch ins Industriezeitalter. - Bd. 1, 232 S., München (Oldenbourg).
- GRIMM, W.-D. (1980): Zum Forschungsvorhaben "Verwitterungsverhalten von Naturwerkstein in München in Abhängigkeit von Zeit und Ort". - Sitz.-Ber. Arbeitskreis "Naturwiss. Forsch. an Kunstgütern aus Stein", München, 35-44, Erlangen (Inst. f. Werkstoffwiss. d. Univ.).
- GRIMM, W.-D. (1983): Zum Verwitterungsverhalten von Naturwerksteinen in München. - Sitz.-Ber. Arbeitskreis "Naturwiss. Forsch. an Kunstgütern aus Stein", Hannover, 41-49, Erlangen (Inst. f. Werkstoffwiss. d. Univ.).
- GRIMM, W.-D. (1984a): Zur Verwitterung von Naturwerksteinen insbesondere bayerischer Provenienz. - *Geologica Bavarica* 86, 507-550, München (Bayer. Geol. Landesamt).
- GRIMM, W.-D. (1984b): Zur Geologie der roten Jurakalksteine ("Rotmarmor") vom Typ der Knollenkalksteine (Adneter Knollenkalke bzw. Ammonitico-rosso-Kalksteine) und der Hierlatzkalksteine im alpinen und mediterranen Raum. - In: GRIMM, W.-D. & SNETHLAGE, R. (1984): Adneter Rotmarmor - Vorkommen und Konservierung. - Arbeitsheft 25 des Bayerischen Landesamtes f. Denkmalpflege, 41 S., München.
- GRIMM, W.-D. & VÖLKL, J. (1983): Rauheitsmessungen zur Kennzeichnung der Naturwerksteinverwitterung. - *Z. dt. geol. Ges.* 134, 387-411, Hannover.
- HEDERER, O. (Hrsg.) (1972): Bauten und Plätze in München - Ein Architekturführer. - 205 S., München (Callwey).
- HEROLD, R. (1976): Schaden an Naturwerkstein-Bekleidung in Unterführungen - ein Versetzproblem? - *Granit International* 5, 26-29, München.
- HIRSCHWALD, J. (1912): Handbuch der bautechnischen Gesteinsprüfung. - 923 S., Berlin (Borntraeger).
- HOFFMANN, U. (1967): Geologische Karte von Bayern 1:25 000, Erläuterung zu Blatt Nr. 6225 Würzburg Süd. - 134 S., München (Bayer. Geol. Landesamt).
- HOLLEMANN, A.F. & WIBERG, E. (1985): Lehrbuch der Anorganischen Chemie. - 91.-100. Aufl., 1451 S., Berlin (de Gruyter).
- HOLLWECK, L. (1972): München in alten Photographien. - 183 S., München (Langen-Müller-Verlag).
- JÜNTGEN, H. & VAN HECK, K.H. (1981): Kohlevergasung. - Thiemig Taschenbücher 94, 185 S., München (Thiemig).
- KESSLER, F.J. (1960): Verwitterungserscheinungen an Bauwerken und Bausteinen (eine Untersuchung der bei Verwitterung von Bunt- und Keupersandsteinen auftretenden Probleme). - 58 S., Diss. Univ. Würzburg.
- KETTNER, H. (1979): Zur Frage des pH-Wertes von Regenniederschlägen und der Versauerung offener Gewässer und des Bodens. - *Gesundheits-Ingenieur* 100, H. 4, 111-112 und 121-122.
- KIESLINGER, A. (1932): Zerstörungen an Steinbauten. - 346 S., Leipzig/Wien (Deuticke).
- KIESLINGER, A. (1959): Rahmenverwitterung. - *Geologie und Bauwesen* 24, 171-186, Wien.
- KLOPPER, H. (1979): Das Kapillarverhalten poröser Baustoffe. - *Techn. Akad. Eßlingen, Lehrgang Nr. 4280/79.88*

- KNÖFEL, D. (1980): Ursachen der Natursteinverwitterung - Natursteinschäden an Bauwerken. - Schriftliche Fassung eines Vortrages bei der Techn. Akademie Eßlingen am 01.02.1980, 36 S.
- KOLLMANN, H. (1978): Mineralogische Untersuchungen über Ausblühungs- und Treiberscheinungen an Baustoffen durch Sulfate. - Giessener Geol. Schriften 18, 172 S., Giessen.
- KRAUS, K. (1985): Experimente zur immissionsbedingten Verwitterung der Naturbausteine des Kölner Doms im Vergleich zu deren Verhalten am Bauwerk. - 210 S., Diss. Univ. Köln.
- KRUMBEIN, W.E. (1966): Zur Frage der Gesteinsverwitterung (über geochemische und mikrobiologische Bereiche der exogenen Dynamik). - 106 S., Diss. Univ. Würzburg.
- KRUMBEIN, W.E. (1973): Über den Einfluß von Mikroorganismen auf die Bausteinverwitterung - eine ökologische Studie. - Deutsche Kunst und Denkmalpflege 31, 54 - 71, München/Berlin.
- LACY, R.E. (1965): Driving-Rain Maps and the Onslaught of Rain on Buildings. - CIB Symposium, Helsinki.
- LAHMANN, E. & PRESCHER, K.E. (1978): Räumliche und zeitliche Verteilung von Stickstoffoxiden in städtischer Luft. - Gesundheits-Ingenieur 99, H. 1/2, 32 - 36.
- L.G.A. (1980): Richtlinie zur Ermittlung der Ausbruchfestigkeit am Ankerdornloch in Fassadenplatten aus Naturwerkstein. - L.G.A.-Rundschau 80 - 4, Landesgewerbeamt Bayern.
- LUCKAT, S. (1972): Ein Verfahren zur Bestimmung der Immissionsrate gasförmiger Komponenten. - Staub-Reinhalt. Luft 32, Nr. 12, 484 - 486, Hannover.
- LUCKAT, S. (1981): Quantitative Untersuchung des Einflusses von Luftverunreinigungen bei der Zerstörung von Naturstein. - Unveröff. Forsch.-Ber. im Auftrag d. Umweltbundesamtes, 139 S., Dortmund (Zollern-Institut). Kurzfassung in: Staub-Reinhalt. Luft 41, Nr. 11, 440 - 442, Hannover.
- MARGGRAF, H. (1894): Die kgl. Bayerischen Staatseisenbahnen in geschichtlicher und statistischer Beziehung. Gedenkschrift zum fünfzigsten Jahrestage der Inbetriebnahme der ersten Staatsbahnstrecke Nürnberg - Bamberg am 1. Oktober 1844. - 286 S., München (Oldenbourg). Neu herausgegeben 1982, Stuttgart (Kohlhammer Edition Eisenbahn).
- MATTHESS, G. (1961): Die Herkunft der Sulfat-Ionen im Grundwasser. - Abh. d. Hess. Landesamtes f. Bodenforsch. 35, 85 S., Wiesbaden.
- MEGELE, M. (1951): Baugeschichtlicher Atlas der Landeshauptstadt München. - Neue Schriftenreihe des Stadtarchivs München 3, 158 S., München.
- MEGELE, M. (1960): Baugeschichtlicher Atlas der Landeshauptstadt München. - Neue Schriftenreihe des Stadtarchivs München 10, 93 S., München.
- MÜLLER, F. (o.J.): Internationale Naturwerkstein Kartei (INSK). - 1-10, Ulm (Ebner).
- NERDINGER, W. (Hrsg.) (1984): Aufbauzeit. Planen und Bauen. München 1945 - 1950. - Ausstellungskataloge der Architektursammlung der TU München und des Münchner Stadtmuseums 5, 184 S., München (Beck).
- NIESEL, K. (1979): Zur Verwitterung von Baustoffen in schwefeloxidhaltiger Atmosphäre. Literaturdiskussion. - Fortschr. Miner. 57, 68 - 124, Stuttgart.
- NIESEL, K. & SCHIMMELWITZ, P. (1982): Zur quantitativen Kennzeichnung des Verwitterungsverhaltens von Naturwerksteinen anhand ihrer Gefügemerkmale. - Forschungsbericht 86, 100 S., Berlin (BAM).

- PEFFEKOVEN, W. (1969): Laboruntersuchungen über den Abrieb von Asphaltbelägen unter Spikereifenverkehr. - Bitumen 69, Nr. 6, 167-173
- PLESSEN, M.L. (Hrsg.) (1983): Die Isar - Ein Lebenslauf. - Katalog zur Ausstellung im Münchner Stadtmuseum, 373 S., München (Hugendubel).
- POSCHLOD, K. (1983): Verwitterungserscheinungen von Naturwerksteinen und Gesteinsmode am Beispiel von Grabsteinen im Alten Südlichen Friedhof zu München. - 226 S., München (unveröff. Diplomarbeit des Inst. f. Allg. u. Angew. Geol. d. Univ. München).
- POSCHLOD, K. & GRIMM, W.-D. (1984): Der Alte Südfriedhof in München, seine Gesteine, seine Restaurierung. - Steinmetz und Bildhauer 100, H. 11, 28-33, München.
- QUERVAIN, F.DE (1945): Verhalten der Bausteine gegen Witterungseinflüsse in der Schweiz. - Beitr. Geol. Schweiz, Geotechn. Ser. 23, Bern (Kümmerly & Frey).
- QUERVAIN, F.DE (1967): Technische Gesteinskunde. - Basel (Birkhäuser).
- QUERVAIN, F.DE & JENNY, V. (1951): Verhalten der Bausteine gegen Witterungseinflüsse in der Schweiz, Teil 2. - Beitr. Geol. Schweiz, Geotechn. Ser. 30, Bern (Kümmerly & Frey).
- REHFUESS, K.E. (1981): Über die Wirkungen der sauren Niederschläge in Waldökosystemen. - Forstwiss. Centralbl. 100, 363-381.
- REICHEL, H. (1975): Die Natursteinverwitterung an Bauwerken als mikroklimatisches und edaphisches Problem in Mitteleuropa. - Tübinger Geogr. Studien 62, 104 S., Tübingen.
- REIS, O.M. (1935): Die Gesteine der Münchner Bauten und Denkmäler. - 243 S., München (Ges. Bayer. Landesg. e.V.).
- RIEDERER, J. (1973): Die Wirkungslosigkeit von Luftverunreinigungen beim Steinerfall. - Staub-Reinh. Luft 33, 15-19, Hannover.
- ROEDLER, F. (1948): Die wahre Sonneneinstrahlung auf Gebäude, ihre Ermittlung, Ausnutzung und Abwehr. - Gesundheits-Ingenieur 69, H. 8, 217-224.
- ROEDLER, F. (1953): Die wahre Sonneneinstrahlung auf Gebäude, Teil II: Berücksichtigung der Beschattung und Bewölkung. - Gesundheits-Ingenieur 74, H. 21/22, 337-350.
- RÖNICKE, G. & RÖNICKE, R. (1972): Über den Mechanismus der zerstörenden Wirkung der Luftverunreinigung am Freiburger Münster. - Deutsche Kunst und Denkmalpflege 30, H. 1, 57-64, München/Berlin.
- SCHEFFER, F. & SCHACHTSCHABEL, P. (1976): Lehrbuch der Bodenkunde. - 9. Aufl., 394 S., Stuttgart (Enke).
- SCHLEICH, E. (1978): Die zweite Zerstörung Münchens. - 192 S., München (Steinkopf Verlag).
- SCHÖN, J. (1983): Petrophysik. - 405 S., Berlin (Akademie-Verlag).
- SCHWARZ, B. & FRANK, W. (1973): Schlagregen. Meßmethoden, Beanspruchung, Auswirkung. - Berichte aus der Bauforschung 86, 57 S., Berlin (Wilhelm Ernst Verlag).
- SCHWEGLER, H. (1971): Luftreinhaltung und Stadtplanung. - Technik + München 9/11, 7-9, München (Stadtwerke).
- SEMBACH, K.J. (1977): München - Photographische Ansichten 1885 bis 1915. - Katalog zur Ausstellung der Neuen Sammlung, 101 S., München.
- SNETHLAGE, R. (1984): Steinkonservierung. - (Mit einem Beitrag von H. MARSCHNER).- Arbeitsheft 22 des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege, 203 S., München.

- SOMMER, E. (1971): Beitrag zur Frage der kapillaren Flüssigkeitsbewegung in porösen Stoffen bei Be- und Entfeuchtungsvorgängen. - 197 S., Diss. Techn. Hochschule Darmstadt.
- STADTWERKE MÜNCHEN (1985): Energiekonzept der Stadtwerke München. - 100 S., Unveröff.
- STATISTISCHES HANDBUCH (1985): Statistisches Handbuch der Landeshauptstadt München 1985. - 565 S., Statistisches Amt der Landeshauptstadt München.
- TILLMANN, H. (1953): Geologisch-hydrologische Karte von München 1 : 50 000. - München (Bayerisches Geologisches Landesamt).
- TONNE, F. (1951): Besonnung und Tageslicht - ein neues Untersuchungsverfahren. - Gesundheits-Ingenieur 72, H. 1/2, 12 - 17.
- TRASSL, H. (1976): Bauchemische und bauphysikalische Einflüsse auf Naturwerkstein-Außenarbeiten. - Bautechn. Inform. 1.7., 23 S., Würzburg (Informationsstelle Naturwerkstein).
- UBA (1980): Luftverschmutzung durch Schwefeldioxid - Ursachen, Wirkungen, Minderung. - 123 S., Berlin (Umweltbundesamt).
- UBA (1984): Daten zur Umwelt 1984. - 397 S., Berlin (Erich Schmidt).
- VDI 3794 Bl. 1 (1979): Bestimmung von Immissionsraten; Bestimmung der relativen Immissionsrate mit Hilfe des IRMA-Verfahrens. - 4 S., Berlin/Köln (Beuth).
- VÖLKL, J. (1982): Eine neue Methode zur Untersuchung der Rauigkeit von Naturwerksteinen mit Beispielen aus München. - 59 S., München (unveröff. Diplomarbeit d. Inst. f. Allg. u. Angew. Geol. d. Univ. München).
- WAGENBRETH, O. (1969): Technische Gesteinskunde. - Naturwiss. Grundwissen für Ingenieure des Bauwesens, Bd. 3, 248 S., Berlin (VEB Bauwesen).
- WEBER, F. (1983): Bausandsteine und ihre Verwitterungsschäden an ausgewählten saarländischen Bauwerken. - 165 S., Saarbrücken (Diss. Univ. d. Saarlandes).
- WEBER, H. (1980): Steinkonservierung. - Kontakt & Studium 59, 172 S., Grafenau (Expert-Verlag).
- WIHR, R. (1980): Restaurierung von Steindenkmälern. - 230 S., München (Callwey).
- WINKLER, E.M. (1975): Stone: Properties, Durability in Man's Environment. - 2. Aufl., 230 S., Wien/New York (Springer).
- WOLFF, H. (1973): Geologische Karte von Bayern 1 : 25 000, Erläuterungen zu Blatt Nr. 8238 Neubauern. - 352 S., München (Bayerisches Geologisches Landesamt).
- WUNDERLICH, H.G. (1968): Einführung in die Geologie, Teil 1: Exogene Dynamik. - BI-Hochschultaschenbuch 340a, 214 S., Mannheim/Wien/Zürich (Bibliographisches Institut).
- ZEHNDER, K. (1982): Verwitterung von Molassesandsteinen an Bauwerken und in Naturaufschlüssen. - Beitr. Geol. Schweiz. Geotechn. Ser. 61, 130 S., Bern (Kümmerly & Frey).

8.2. Verzeichnis der Abbildungen

Seite

Abb. 1:	Gebietsaufteilung der Innenstadt in Kartierviertel	9
Abb. 2:	Gebietsaufteilung der Innenstadt in Kartierbezirke	10
Abb. 3:	Stadtentwicklung Münchens vom 14. bis zum 19. Jh.	51
Abb. 4:	Verbaudaten natursteintragender Gebäude	56
Abb. 5:	Verbaudaten wichtiger Werksteinarten an Gebäuden	57
Abb. 6:	Verbaudaten natursteintragender Denkmäler, Plastiken und Brunnen	60
Abb. 7:	Tagesmittelwerte einiger meteorologischer und lufthygienischer Kenngrößen im Jahresverlauf 1980	74
Abb. 8:	Geologische Verhältnisse im Münchner Stadtgebiet	76
Abb. 9:	Profilschnitt entlang der U-Bahn-Strecke zwischen Sendlinger-Tor-Platz und Odeonsplatz	76
Abb. 10:	Jahresgang der Lufttemperaturen in München im langjährigen Mittel	79
Abb. 11:	Astronomisch maximal mögliche Strahlungsmengen durch Insolation auf verschieden exponierte Fassadenflächen	81
Abb. 12:	Mittlere Monatssummen der Sonnenscheindauer in München	82
Abb. 13:	Windrose und Niederschlagswindrose	84
Abb. 14:	Mittlere SO ₂ -Belastung der Luft bei verschiedenen Windrichtungen	85
Abb. 15:	Stärkewindrose München-Riem 1951 - 1960	86
Abb. 16:	Typische Verläufe von Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit für einige Sommer- und Wintertage	89
Abb. 17:	Mittlere monatliche Niederschlagshöhen in München 1931 - 1960	92
Abb. 18:	Verschiedene 'Spezies' von Niederschlagswasser an einer Gebäudefassade	93
Abb. 19:	Niederschlagsintensitäten für Normalregen und Schlagregen während einer Periode intensiver Niederschläge	95
Abb. 20:	Beispiele für Zeitverläufe der Niederschlagsintensität (Schlagregen)	95
Abb. 21:	Jahresgänge des monatlichen Staubbiederschlags in München	103
Abb. 22:	Entwicklung der Kohlendioxidkonzentration in der Atmosphäre seit 1958 (Hawaii)	110
Abb. 23:	Jahresgänge der monatlichen SO ₂ -Immissionen in München	112
Abb. 24:	Zusammenhang zwischen der SO ₂ -Immissionsrate und der Gewichtsveränderung exponierter Gesteinsproben	113
Abb. 25:	Jahresgänge der monatlichen NO _x -Immissionen in München	115
Abb. 26:	pH-Werte im Niederschlag an der Station Schauinsland 1965 - 1973	116
Abb. 27:	Menge des Staubbiederschlags und pH-Werte des bei den Staubbiederschlagsmessungen gesammelten Niederschlagswassers an 11 Münchner Meßstationen von 1981 bis 1983	117

Abb. 28:	Entwicklung der mittleren SO ₂ -Immissionen in München 1965 - 1982	136
Abb. 29:	Entwicklung des fossilen Brennstoffeinsatzes der Stadtwerke München zur Strom- und Wärmeerzeugung von 1960 bis 1983	137
Abb. 30:	Primärenergieverbrauch in Bayern von 1950 bis 1978	137
Abb. 31:	Derzeitige und künftige Schadstoffemissionen der Strom- und Fernwärmeerzeugungsanlagen der Stadtwerke München	138
Abb. 32:	Fossiler Brennstoffbedarf und Mülleinsatz für die Strom- und Fernwärmeerzeugung der Stadtwerke München bis 2005	139
Abb. 33:	Fahrleistungen des Kraftfahrzeugverkehrs in der Bundesrepublik Deutschland von 1960 bis 1982	140
Abb. 34:	Relative Änderungen der NO _x -Abgasemissionen für PKW in der BRD	141
Abb. 35:	Intensitäten der Salzsäden in den Gesteinsgroßgruppen	156
Abb. 36:	Intensitäten der Salzsäden an einzelnen Gesteinsarten	157
Abb. 37:	Schadenshäufigkeiten im Spektrum der Schadensformen	168
Abb. 38:	Häufigkeiten der Schadensformen in 3 Intensitätsklassen	169
Abb. 39:	Schadensanteile in der Nähe von Gebäudeeingängen, gemessen an den Gesamtschadenszahlen im Sockelbereich	169
Abb. 40:	Richtungsrosen der natursteinverkleideten und der mit Salzsäden behafteten Sockelstrecken	172
Abb. 41:	Häufigkeiten von Salzsäden in den einzelnen Expositionsrichtungen	173
Abb. 42:	Richtungsabhängige Verwitterungsfaktoren (Regenwindrichtungen und mögliche Insolationsdauer pro Jahr)	173
Abb. 43:	Synthetischer Kurvenverlauf zur Expositionsabhängigkeit von Salzsäden	174
Abb. 44:	REM-Aufnahme einer unverwitterten Muschelkalk-Bruchfläche	184
Abb. 45:	REM-Aufnahme einer raugewitterten Muschelkalk (Blaubank)-Oberfläche (Pacellistr. 1)	184
Abb. 46:	REM-Aufnahme einer raugewitterten Muschelkalk-Oberfläche (Ausschnitt aus Abb. 45)	186
Abb. 47:	REM-Aufnahme einer raugewitterten Muschelkalk-Oberfläche (vergrößerter Ausschnitt aus Abb. 45)	186
Abb. 48:	REM-Aufnahme von angelösten Calcitkörnern einer raugewitterten Muschelkalk-Oberfläche (Pacellistr. 1)	187
Abb. 49:	REM-Aufnahme von leicht angelösten Calcitkörnern, zwischen denen neugebildete Gipskristalle sprossen (Pacellistr. 1)	187
Abb. 50:	REM-Aufnahme einer bereichsweise leicht gipsverkrusteten Muschelkalk-Oberfläche (Lenbachplatz 7)	190
Abb. 51:	REM-Aufnahme von neugesprossenen Gipskristallen auf einer Muschelkalk-Oberfläche (Vergrößerter Ausschnitt aus Abb. 50)	190
Abb. 52:	REM-Aufnahme einer gipsverkrusteten Muschelkalk-Oberfläche (Pacellistr. 1)	191
Abb. 53:	REM-Aufnahme von Krustengipsen auf einer Muschelkalk-Oberfläche (Pacellistr. 1)	191

Abb. 54:	REM-Aufnahme von Gipskrustenbildungen auf einer Muschelkalk-Oberfläche (Pacellistr. 1)	192
Abb. 55:	REM-Aufnahme von Gipskristallen, die zwischen den Calcitkörnern einer Muschelkalk-Oberfläche herausprossen (Pacellistr. 1)	192
Abb. 56:	Relative Schadenshäufigkeiten von "rauhgewitterten" Muschelkalkfassaden in Abhängigkeit von den Expositionsrichtungen	197
Abb. 57:	Relative Schadenshäufigkeiten von "netzartig gedunkelten" Muschelkalkfassaden in Abhängigkeit von den Expositionsrichtungen	197
Abb. 58:	Relative Schadenshäufigkeiten von "Gipsverkrustungen" an Muschelkalkfassadenflächen in Abhängigkeit von den Expositionsrichtungen	198
Abb. 59:	Relative Schadenshäufigkeiten von durchgehend "gipsverkrusteten" Muschelkalkfassaden in Abhängigkeit von den Expositionsrichtungen	198
Abb. 60:	Relative Schadenshäufigkeiten von Muschelkalk-Fassaden mit "Ausplatzungen", "Ausbrüchen", "Absandungen" und "Austlühungen" in Abhängigkeit von den Expositionsrichtungen	199
Abb. 61:	REM-Aufnahme von Krustengipsen auf Granit (TUM Luisenstraße)	206
Abb. 62:	REM-Aufnahme eines Profilschnittes durch eine auf Granit aufgewachsene Gipskruste (TUM Luisenstraße)	206
Abb. 63:	REM-Aufnahme eines gipsverkrusteten Granitprobenstückes mit eingewachsenem Zinkspatkristall (TUM Luisenstraße)	208
Abb. 64:	REM-Aufnahme einer Gipskruste auf Granit mit eingestreuten NaCl-Kristallen (Alter Justizpalast)	208
Abb. 65:	REM-Aufnahme einer Gipskruste auf Granit mit eingestreuten NaCl-Kristallen (Ausschnittvergrößerung aus Abb. 64)	209
Abb. 66:	REM-Aufnahme von Gipskristallen eines verkrusteten Granitprobestückes mit eingewachsenem NaCl-Kristall (Ausschnittvergrößerung aus Abb. 65)	209
Abb. 67:	REM-Aufnahme einer schwarzen 'Lackkruste' auf Granit (Armeemuseum)	210
Abb. 68:	REM-Aufnahme einer schwarzen 'Lackkruste' auf Granit in starker Vergrößerung (Ausschnitt aus Abb. 67)	210
Abb. 69:	REM-Aufnahme einer schwarzen 'Lackkruste' auf Granit (TUM Luisenstraße)	212
Abb. 70:	REM-Aufnahme einer schwarzen 'Lackkruste' auf Granit in starker Vergrößerung (Ausschnitt aus Abb. 69)	212
Abb. 71:	Relative Schadenshäufigkeiten von "abschalenden" Granitsockelstrecken in Abhängigkeit von den Expositionsrichtungen	221

8.3. Verzeichnis der Tabellen

Seite

Tab. 1:	Auszug aus dem Text der Allgemeinen Stadtkartierung	7
Tab. 2:	Gebäudezahlen im untersuchten Stadtgebiet mit Gebäudezahlen ohne Natursteinverwendung	13
Tab. 3:	Gebäudezahlen mit Natursteinverwendung im untersuchten Stadtgebiet	14
Tab. 4:	Einzelstehende Objekte mit Natursteinverwendung	15
Tab. 5:	Gebäudeteile aus Naturstein	16
Tab. 6:	Einzelstehende Objekte aus Naturstein	18
Tab. 7:	Häufigkeiten der Naturwerksteinvorkommen (Hauptgesteinarten - alle Bauteile)	20
Tab. 8:	Häufigkeiten der Naturwerksteinvorkommen (Gesteinsgruppen - alle Bauteile)	20
Tab. 9:	Naturwerksteinbestand der Münchner Innenstadt	22
Tab. 10:	Fassadenverkleidungen	24
Tab. 11:	Bodenbeläge	25
Tab. 12:	Stufen und Schwellen	26
Tab. 13:	Denkmäler, Brunnen, Plastiken	27
Tab. 14:	Schrifttafeln und Epitaphien	27
Tab. 15:	Wand- und Brüstungsverkleidungen von Unterführungen	28
Tab. 16:	Verwitterungserscheinungen '1. Ordnung'	30
Tab. 17:	Auszug aus der Liste der Gebäudedatierungen	50
Tab. 18:	Verbaudaten der Werkgesteinsarten an Denkmälern, Brunnen und Plastiken	62
Tab. 19:	Verwitterungsfaktoren, Verwitterungsvorgänge und Verwitterungserscheinungen	65
Tab. 20:	Die meteorologischen Monatswerte in München im Jahresdurchschnitt 1964 - 1983	71
Tab. 21:	Die monatlichen Hauptwitterungsmerkmale nach der Zahl der Tage besonderer Klimaeigenschaften im Jahresdurchschnitt 1964 - 1983	72
Tab. 22:	Die Hauptwitterungsmerkmale nach der Zahl der Tage besonderer Klimaeigenschaften	72
Tab. 23:	Ausgewählte Beobachtungen des Deutschen Wetterdienstes, Wetteramt München	73
Tab. 24:	Lineare Ausdehnungsbeträge einiger Gesteinsarten	80
Tab. 25:	Stärkewindrose München-Riem 1951 - 1960	86
Tab. 26:	Biegefestigkeiten verschiedener Gesteine	87
Tab. 27:	Hygrische Längenänderungen einiger Gesteinsarten	90
Tab. 28:	Staubproben aus der Münchner Innenstadt	106
Tab. 29:	Chemische Analysen des wäßrigen Lösungsausguges von 4 Staubproben	107
Tab. 30:	Salzanteile im Straßenstaub	107

Tab. 31:	Emissionen, die bei der Energiegewinnung aus fossilen Brennstoffen entstehen	108
Tab. 32:	Ausblühungssalze und deren Hydratstufen	118
Tab. 33:	Probenahmen von Regenwasser in der Innenstadt Münchens	122
Tab. 34:	Chemische Analysen des Lösungsinhaltes von 4 Regenwasserproben aus der Münchner Innenstadt	122
Tab. 35:	Probenahmen von Schnee und Schneematsch in der Münchner Innenstadt	123
Tab. 36:	Chemische Analysen des Lösungsinhaltes von Schnee und Schneematsch aus der Münchner Innenstadt	124
Tab. 37:	Typische durch Verstädterung verursachte Klimaveränderungen	132
Tab. 38:	Gründungsdaten einiger wichtiger in München entstandener Industriebetriebe	134
Tab. 39:	Feuerungsanlagen der Stadtwerke München zur Strom- und Wärmeerzeugung	136
Tab. 40:	Verkehrszählungen in München 1977 - 1984	141
Tab. 41:	Auszug aus der Spezialkartierung: Bruchschäden an Naturwerksteinen	150
Tab. 42:	Bruchschäden an Naturwerksteinen in der Münchner Innenstadt	152
Tab. 43:	Häufigkeit von Salzverwitterungsschäden im Sockelbereich von Gebäuden der Münchner Innenstadt	153
Tab. 44:	Auszug aus der Spezialkartierung: Schäden durch Ausblühungssalze im Sockelbereich von Gebäuden der Münchner Innenstadt	154
Tab. 45:	Von Salzschäden betroffene Gesteinsarten	155
Tab. 46:	Rangfolge der Gesteinsarten nach dem spezifischen Schadensanteil	158
Tab. 47:	Schadensformen durch Ausblühungssalze an verschiedenen Gesteinsarten	164
Tab. 48:	Intensitäten der verschiedenen Salzschadensformen - absolute Zahlen	167
Tab. 49:	Schadenshäufigkeiten in bezug auf die Verwitterungsformen in den verschiedenen Intensitätsklassen	167
Tab. 50:	Schadenshäufigkeiten in bezug auf die Intensitäten der verschiedenen Schadensformen	168
Tab. 51:	Schadenshäufigkeiten in den einzelnen Fassadenexpositionen	171
Tab. 52:	Häufigkeiten von Salzschäden in Abhängigkeit von den Fassadenexpositionen	172
Tab. 53:	Probenahmen an verwitterten, mit Ausblühungssalzen durchsetzten Naturwerksteinen	176
Tab. 54:	Chemische Analysen von Ausblühungssalzen stark verwitterter Werksteinproben	177
Tab. 55:	Wassergehalte und Salzanteile stark verwitterter und salzhaltiger Werksteinproben	180
Tab. 56:	Gemessener und berechneter Gewichtsverlust bei der Entwässerung von Epsomit zu Kieserit	180
Tab. 57:	Auszug aus der Spezialkartierung: Verwitterung des Muschelkalks	182

Tab. 58:	Expositionsdauer und Verwitterungszustand von Muschelkalk-Werksteinen mit Verbaudaten zwischen 1887 und 1981	194
Tab. 59:	Auszug aus der Spezialkartierung: Schalenverwitterung nordostbayerischer Granite	202
Tab. 60:	Expositionsdauer und Verwitterungszustand von Granitsockelgesteinen mit Verbaudaten zwischen 1740 und 1980	218
Tab. 61:	Verwitterungsfortschritt an Granitsockelsteinen mit Verbaudaten zwischen 1740 und 1910	220

8.4. Verzeichnis der Anlagen

Anlage 1	Gesteinsarten	1a	Altstadt
		1b	Stadterweiterungen des 19. Jh.
Anlage 2	Verwitterungszustand	2a	Altstadt
		2b	Stadterweiterungen des 19. Jh.
Anlage 3	Expositionsdauer	3a	Altstadt
		3b	Stadterweiterungen des 19. Jh.

Lebenslauf

Ulrich Schwarz

- 05.10.1951 Geburt in Pirmasens
Eltern: Robert Schwarz, Lehrer
 Albertine Schwarz, geb. Rettig
- 1958 Eintritt in die Volksschule in Pirmasens
- 1963 Übertritt in das Altsprachliche Gymnasium
Pirmasens (Immanuel Kant-Gymnasium)
- 1972 Abitur
- WS 1972 Studienbeginn im Fach Geologie/Paläontologie
an der Westfälischen Wilhelms-Universität
Münster
- 04.02.1975 Diplom-Geologen-Vorprüfung
- Sommer 1975 Angestellter am Niedersächsischen Landesamt
für Bodenforschung, Abteilung Hydrogeologie,
Hannover
- WS 1975 Fortsetzung des Studiums der Geologie/Paläonto-
logie an der Ludwig-Maximilians-Universität
München
- 16.04.1980 Diplom-Geologen-Hauptprüfung
- 1980 ~ 1982 Mitarbeit am Forschungsvorhaben der Stiftung
Volkswagenwerk zum Thema: "Verwitterung von
Naturwerksteinen in München in Abhängigkeit
von Zeit und Ort" unter der Leitung von Prof.
Dr. W.-D. GRIMM
- 1982 - 1986 Anstellung als Vollbeschäftigte Wissenschaftliche
Hilfskraft auf der Stelle eines Akademischen Rates
auf Zeit am Institut für Allgemeine und Angewandte
Geologie der Universität München
- seit 1986 Mitarbeit am Forschungsvorhaben des BMFT zum Thema:
"Verwitterung von Denkmälern der BRD" unter der
Leitung von Prof. Dr. W.-D. GRIMM

